

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«КУЗБАССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Т. Ф. ГОРБАЧЕВА»

На правах рукописи

\\

1

Митрофанова Кристина Сергеевна

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

Специальность: 2.5.6 – Технология машиностроения

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель: доктор технических наук,
профессор В. Ю. Блюменштейн

Кемерово – 2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1. ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ И ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ППД.....	13
1.1. Влияние ППД на формирование качества поверхностного слоя деталей машин и направления интенсификации процесса.....	13
1.2 Анализ феноменологических, математических, кинетических и конечно-элементных моделей процессов ППД.....	27
1.3 Анализ механики процесса ППД и роль среднего нормального напряжения.....	46
1.4 Анализ способов, устройств и деформирующих инструментов для обеспечения высокого гидростатического давления в очаге деформации в процессах ППД.....	49
1.5 Выводы. Цель и задачи исследования.....	63
ГЛАВА 2. МЕХАНИКА ПРОЦЕССА ППД МУЛЬТИРАДИУСНЫМ РОЛИКОМ.....	67
2.1 Структурная модель формирования поверхностного слоя детали при ППД МР-роликом.....	67
2.2 Феноменологическая модель ППД МР-роликом.....	73
2.2.1 Формирование очага деформации при ППД МР-роликом.....	73
2.2.2 Этапы нагружения поверхностного слоя детали инденторами мультирадиусного ролика.....	76
2.2.2.1 Первый этап нагружения ПС МР-роликом: внедрение и перемещение деформирующего индентора $R_{пр1}$	77
2.2.2.2 Второй этап нагружения ПС МР-роликом: внедрение и перемещение деформирующего индентора $R_{пр2}$	79
2.2.2.3 Третий этап нагружения ПС МР-роликом: внедрение и перемещение деформирующего индентора $R_{пр3}$	82
2.2.2.4 Четвертый этап нагружения ПС МР-роликом: внедрение и перемещение деформирующего индентора $R_{пр4}$	85
2.3 Постановка задачи МКЭ моделирования процесса ППД МР-роликом.....	88
2.4 Анализ напряженно-деформированного состояния очага деформации и поверхностного слоя детали.....	94
2.5 Расчет и анализ накопления деформаций и исчерпания запаса пластичности металла.....	103
2.6 Выводы по главе 2.....	107
3. МЕТОДИКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	110
3.1 Программа экспериментальных исследований.....	110
3.2 Обоснование выбора материалов образцов, методика их подготовки и выбор технологической оснастки.....	112
3.2.1 Выбор материалов образцов.....	112
3.2.2 Выбор технологической оснастки.....	115
3.2.3 Методика и режимы обработки ППД МР-роликом.....	118
3.3 Методики исследования формирования очага деформации при ППД МР-роликом.....	120
3.3.1 Методика исследования очага деформации при радиальном внедрении МР-ролика без вращения детали.....	120

3.3.2 Методика исследования очага деформации при радиальном внедрении МР-ролика при вращении детали.....	121
3.3.3 Методика исследования очага деформации при обработке МР-роликом.....	124
3.4 Методика исследования шероховатости поверхности.....	125
3.5 Методика исследования упрочнения поверхностного слоя.....	126
3.5.1 Пробоподготовка образцов для последующего измерения микротвердости...	126
3.5.2 Методика измерения микротвердости.....	129
3.6 Методики тонких физических исследований упрочненного поверхностного слоя.....	133
3.6.1 Пробоподготовка образцов для тонких физических исследований.....	133
3.6.2 Методика проведения оптической микроскопии (ОМ), атомно-силовой микроскопии (АСМ) и рентгеноструктурного анализа.....	135
3.7 Алгоритм статистической обработки экспериментальных данных.....	139
3.8 Выводы по главе 3.....	142
ГЛАВА 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ПОСЛЕ ППД МР-РОЛИКОМ.....	145
4.1 Исследования формирования очага деформации при ППД МР-роликом.....	145
4.1.1 Исследование геометрии очага деформации при статическом внедрении МР-ролика (при выключенной подаче и оборотах станка).....	147
4.1.2 Исследование геометрии очага деформации при статическом внедрении МР-ролика при вращении образца.....	151
4.1.3 Исследование геометрии очага деформации при обработке МР-роликом...	152
4.1.4 Сравнительный анализ аналитических результатов МКЭ-моделирования процесса ППД МР-роликом.....	154
4.2 Исследование влияния режимов обработки на шероховатость и волнистость поверхностного слоя.....	158
4.3 Исследование влияния режимов обработки на упрочнение поверхностного слоя.....	162
4.4 Исследование упрочненного поверхностного слоя методами оптической (ОМ), атомно-силовой (АСМ) микроскопии и рентгеноструктурного анализа (РСА).....	173
4.4.1 Исследование упрочненного слоя.....	173
4.4.2 Исследование картины пластического течения металла в очаге деформации.....	192
4.5 Выводы по главе 4.....	200
5. ПРОМЫШЛЕННАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	203
5.1 Методика решения прямой, (инженерно-технологической) и обратной (эксплуатационной) задачи с использованием наследственных статистических зависимостей.....	203
5.1.1 Решение прямой (инженерно-технологической) задачи.....	203
5.1.2 Решение обратной (эксплуатационной) задачи.....	207
5.2. Рекомендации по выбору/конструированию и области применения обработки мультирадиусными деформирующими инструментами.....	210
5.3 Апробация результатов работы в промышленности.....	212
5.4 Экономическая эффективность.....	218
5.5 Выводы по главе 5.....	222
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	225
ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ, УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ, СИМВОЛОВ,	227

ЕДИНИЦ И ТЕРМИНОВ.....	
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	230
ПРИЛОЖЕНИЕ.....	253

ВВЕДЕНИЕ

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. До недавнего времени на угольных шахтах и разрезах превалировало импортное оборудование производства Польши, Великобритании, США, Австралии и других стран (шахтные механизированные крепи, проходческие и добычные комбайны, буровые машины, конвейеры, вспомогательные машины и др.). Анализ рынка горно-шахтного оборудования (ГШО), используемого в Кузбассе, показал, что ремонт и модернизация уже имеющегося оборудования – основное направление и основная статья затрат на угледобывающих предприятиях. Практически все виды ГШО является гидрофицированными ввиду высокой газоопасности угольных пластов; при этом основой горнодобывающих комплексов является силовая гидравлика: гидроцилиндры, гидродомкраты, гидрораспределители и т.д. К ответственным компонентам гидроцилиндров относятся штоки, изготавливаемые из конструкционных сталей (стали 45, 40Х, 30ХГСА); 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. 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. Выявлено, на 30 ремонтируемых в год угольных ставов приходится закупать 160 штоков. Такое количество обусловлено выходом их из строя, по таким причинам, как: работа оборудования сверх нормы, некачественная рабочая поверхность штоков, требующая дополнительного упрочнения и повышения эксплуатационных свойств.

Анализ проблемы повышения качества поверхностного слоя ответственных деталей силовой гидравлики горно-шахтного оборудования, а также вентиляционных насосов, работающих в условиях подземной и открытой добычи угля, а также на вредных химических производствах и других показал, что к числу перспективных методов

упрочнения таких деталей относится метод поверхностного пластического деформирования (ППД). ППД позволяет обеспечить высокое качество поверхностного слоя и, в свою очередь, высокие эксплуатационные свойства, в том числе, при работе изделий в условиях статического и сложного циклического нагружения [1]. При этом статические методы ППД (обкатывание, раскатывание роликом или шариком, алмазное выглаживание) не обеспечивают требуемую глубину упрочнения (до 4-5 мм) и степень упрочнения (до и более 40%) поверхностного слоя таких деталей в силу физических особенностей. Динамические способы ППД (центробежная, дробеструйная, гидродробеструйная обработка, чеканка, обработка микрошариками и вращающимися металлическими щетками - ВМЩ), при которых осуществляется ударное деформационное воздействие на обрабатываемую поверхность рабочих тел или инструмента в условиях прерывистого контакта, тоже обладают рядом ограничений, основным из которых является ухудшение шероховатости обрабатываемой поверхности. Недостатками при упрочнении комбинированной статической и динамической нагрузками являются малый КПД при динамическом нагружении, низкая производительность процесса упрочнения (глубина упрочненного слоя составляет не более 0,09...0,15 мм) вследствие низкой энергии удара и сложность осуществления управления процессом упрочнения [1, 83, 282].

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 деформирующих инструментов свыше 0,05 мм. В свою очередь, динамические методы не могут быть применены для таких деталей по конструктивным и технологическим признакам, а также параметрам качества поверхностного слоя.

Анализ результатов отечественных и зарубежных исследований позволил установить направления интенсификации процессов статического ППД, заключающиеся в создании схем обработки с многорадиусной рабочей поверхностью профиля, обеспечивающих сложное напряженно-деформированное состояние, повышение качества поверхностного слоя и высокую долговечность в условиях приложения эксплуатационных циклических нагрузок. К их числу относятся процессы статического ППД сложнопрофильными инструментами, сочетающимися в одной наладке несколько деформирующих инденторов. Выявлено, что реализация схем обработки с преобладающим высокими

сжимающими напряжениями (высоким гидростатическим давлением) в очаге деформации приводит к интенсивному пластическому течению металла, измельчению структуры, высокому упрочняющему эффекту без разрушения металла поверхностного слоя.

На кафедре «Технология машиностроения» КузГТУ в рамках научного направления «Механика технологического наследования на стадиях жизненного цикла деталей машин» при решении данного вопроса был разработан ряд сложнопрофильных деформирующих инструментов. Одним из таких является мультирадиусный ролик (МР-ролик), представляющий собой инструмент с деформирующими инденторами, расположенными относительно друг друга с некоторым смещением в радиальном направлении (патент РФ № 2557377). Выявлено, что применение мультирадиусного ролика (МР-ролика, включающего четыре деформирующих индентора, расположенных определенным образом вдоль оси и в радиальном направлении, позволяет создать требуемую схему нагружения даже при натягах свыше 0,15 мм, обеспечить высокие сжимающие напряжения в очаге деформации (гидростатическое давление) 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 теории данного процесса; отсутствие развитых структурных моделей, позволяющих проектировать данную технологию; отсутствие стабильных результатов исследования качества ПС и целый ряд других данных. Отсутствие этих данных является сдерживающим фактором внедрения нового процесса в промышленность. Таким образом, с одной стороны, в современном машиностроении существует потребность в новом, высокопроизводительном и эффективном отделочно-упрочняющем способе обкатывания, с другой стороны, – отсутствуют научные данные и промышленные технологические рекомендации по обеспечению высокого качества поверхностного слоя, что определило актуальность данной работы.

Степень разработанности темы. Диссертационная работа основывается на результатах теоретических и экспериментальных исследований ППД, изложенных в трудах ученых: 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., Мартыненко О. В., Матлин М. М., Рахимьянов Х. М., Смелянский В. М., Смоленцев В. П., Соловьев Д. Л., Сус-

лов 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 решен следующий комплекс **задач**:

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 армко-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), рентгено-структурного 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 (микроискажений) кристаллической решетки ($\langle \varepsilon^2 \rangle^{1/2}$, 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, исследования в области упрочняющих технологий и механики поверхностного пластического деформирования, физики металлов и металловедении.

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 доклада и тезисов в сборниках трудов научных конференций и семинаров.

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

Автор выражает благодарность сотрудникам кафедры «Технологии машиностроения» КузГТУ: ст. преп. Учайкину Сергею Евгеньевичу, доцентам Пимонову Максиму Владимировичу, Кречетову Андрею Александровичу и Махалову Максиму Сергеевичу за организацию и проведение совместных исследований. Автор выражает благодарность научным сотрудникам лаборатории «Физики прочности» ИФПМ СО РАН (г. Томск) – доктору физико-математических наук Баранниковой Светлане Александровне, и кандидату технических наук Шляховой Галине Витальевне за содействие в проведении тонких физических исследований.

ГЛАВА 1. ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ И ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ППД

1.1. Влияние ППД на формирование качества поверхностного слоя деталей машин и направления интенсификации процесса

Одной из ключевых задач в современном машиностроении является повышение качества поверхностного слоя (ПС) и эксплуатационных свойств ответственных деталей машин. К ним можно отнести защитные втулки насосов, штоки цилиндров силовой гидравлики горных машин, валы редукторов горношахтного оборудования, детали газотурбинных двигателей (ГТД), детали гидроаппаратуры и др.

Известно, что качество ПС ответственных деталей машин определяется микрогеометрическими характеристиками и физико-механическими свойствами. При этом важно учитывать такое явление в ПС детали, как технологическое наследование (ТН) физико-механических свойств; данные свойства формируются в ПС на протяжении всего технологического процесса изготовления детали и изменяются при ее эксплуатации.

Также известно, что качество поверхностного слоя во многом влияет на эксплуатационные свойства детали – долговечность в условиях приложения усталостных нагрузок, износостойкость, коррозионную стойкость, жаропрочность и другие [1-8].

Одним из технологических методов, обеспечивающих наличие комплекса благоприятных свойств в ПС деталей машин, является поверхностное пластическое деформирование. Поверхностное пластическое деформирование (ППД) – это обработка давлением деформирующими инструментами (шариками, роликами, выглаживателями и др.), при которой пластически деформируется только поверхностный слой материала и не образуется стружка. При ППД накатыванием в результате деформационного упрочнения ПС, возникновения в нем сжимающих остаточных напряжений (ОН), сглаживания неровностей и улучшения их профиля повышается прочность деталей при циклических нагрузках в 1,5-2,5 раза, а долговечность в 5-10 раз и более.

Закономерности процесса ППД отражены во многих отечественных и зарубежных исследованиях. Весомый вклад в развитие данного метода внесли ученые: Афонин А. Н., Бабичев А. П., Балтер М. А., Барац Я. М., Блюменштейн В. Ю., Бобровский И. Н., Букатый С. А., Бубнов А. С., Дрозд М. С., Емельянов В. Н., Жасимов М. М., Зайдес С. А., Кузнецов В. П., Киричек А. В., Киселев Е. С., Кропоткина Е. Ю., Кудрявцев И. В.,

Маркус Л. И., Мартыненко О. В., Матлин М.М., Минаков А. П., Отений Я. Н., Проскуряков Ю. Г., Рахимьянов Х. М., Сидякин Ю. И., Смелянский В. М., Смоленцев В. П., Соловьев Д. Л., Сорокин В. М., Суслов А. Г., Тамаркин М. А., Торбило В. М., Тотай А. В., Хейфец М. Л., Хибник Т. А., Ярославцев В. М., Ящерицын П. И., *Abrao A. M., Anchev A. P., Ao N., Altenberger I., Arun M. K., Brinksmeier E., Brockman R. A., Denkena B., Hassan A. M., Kumar S., Klocke F., Lu K., Liu D., Meyer D., Majzoubi G. H., Mohammadi F., Nalla R. K., Nermat M., Sano Y., Song G. L., Slavov S. D., Prevey P. S., Rodriguez A., Rami A., Tang Z. Q., Teimouri R., Wang B., Wagner L., Wang W. W., Wang S. J., Zhang S., Zhang X.*

Разработки, выполненные в период 1940-1990-х гг., не потеряли актуальности и конкурентоспособности и в настоящее время. Следует отметить, что в настоящее время область применения методов значительно расширилась. Так, помимо обработки валов, осей, штоков методом ППД стали обрабатывать:

1. Резьбовые поверхности [9-13]. Так, *Cheng M.* с соавторами [11] при обработке резьбовой поверхности образцов из низкоуглеродистой стали (*Aer Met 100 Alloy*) методом ультразвукового ППД установил снижение шероховатости в 2 раза Ra до 0,051 (при исходной Ra 0,106), увеличение глубины упрочнения до 20 мм, а также увеличение усталостной долговечности в 7 раз.

2. Поверхности лопаток турбин газотурбинных двигателей (ГТД) [14-19]. Ножницким Ю. А. с соавторами в работе [19] методом ППД шариками упрочняются входные и выходные кромки рабочих и спрямляющих лопаток, торцы рабочих лопаток, а также хвостовики лопаток с целью снижения повреждений типа фреттинга (легированный титановый сплав «С»). Установлено, что благодаря обкатыванию шариком в поверхностном слое кромок лопатки создаются сжимающие остаточные напряжения (до – 875 МПа) на глубину до 1 мм, которые не релаксируют при длительном нагреве до рабочей температуры лопатки. Упрочнение шариком практически полностью устраняет влияние на усталостную прочность повреждений глубиной 0,25 мм от удара постороннего предмета.

3. Детали из материалов, полученных методом порошковой металлургии [20-24]. *Kropotkina E.* с соавторами [20] установлено, что обкатывание деталей роликом ($\varnothing 30-60$ мм, R_{np} от 5 до 20 мм; S от 0,1 до 0,2 мм/об; n от 250 до 315 об/мин; P от 1700 до 2610 Н) направляющего аппарата погружного насоса для добычи нефти, изготовленных из порошковой стали композиционных порошковых материалов на основе системы

железо-медь ($Fe/Cu15$ и $Fe/Cu20/Cr11/Ni8$), позволило снизить шероховатость Ra до 0,41-0,61 мкм (при исходной Ra 1,46 мкм), а также увеличить микротвердость на 7-10%. Применение упрочнения деталей из порошковой стали методом ППД обеспечивает снижение интенсивности изнашивания образцов в 1,5–1,6 раза по сравнению с образцами без ППД.

4. Материалы покрытий [25-28]. *Ао Н.* с соавторами [28], применяя метод ППД с наложением ультразвуковых колебаний (УЗК), улучшили усталостные характеристики стержневых образцов из отожженного титанового сплава ($Ti-6Al-4V$) с покрытием, нанесенным методом плазменного электролитического окисления (*plasma electrolytic oxidation (PEO)*). Процесс ПЭО протекал в водном электролите, состоящем из 20 г/л Na_2SiO_3 , 8 г/л $(NaPO_3)_6$ и 2 г/л $Na OH$ при плотности тока 5 А/дм². Установлено, что ППД УЗК ($P = 900$ Н; $n = 150$ об/мин; $S = 0,20$ мм/об; частота 20 кГц; амплитуда 20 мкм) приводит к созданию наноструктуры, уменьшению пористости и плотности дефектов в покрытии, а также к образованию благоприятных сжимающих напряжений достигающих значений до -1200 МПа (рис. 1.1).

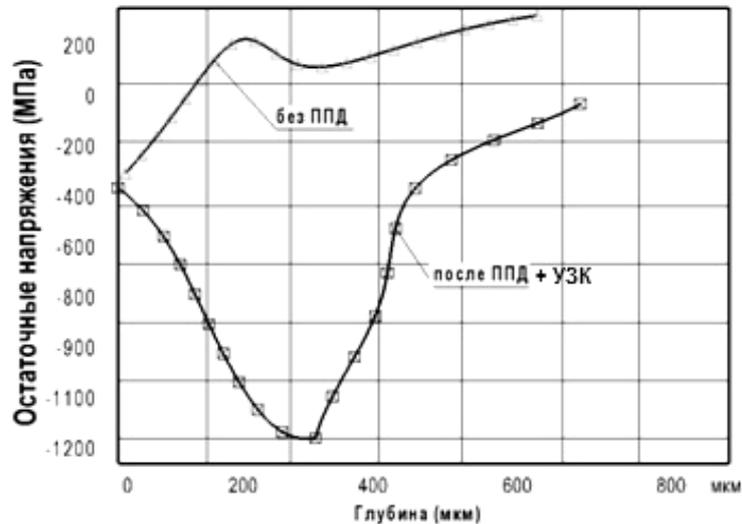


Рисунок 1.1 Распределение остаточных напряжений в покрытии после обработки ППД УЗК шариковым обкатником [28]

5. Биосовместимые сплавы для имплантов [29-34]. *Thesleff A.* с соавторами [30] установили, что в результате упрочнения костных имплантов из титанового сплава $Ti6Al4V$ методом ППД (шариком), увеличились усталостные характеристики. Экспериментальные усталостные образцы, обработанные ППД, выдержали в среднем 108780 циклов нагрузки, по сравнению с 37845 циклами нагрузки для необработанных образцов.

6. Аддитивные материалы. Полученные *Sanguedolce M.* в работе [35] данные показали, что усталостная долговечность образцов из порошковой нержавеющей стали (*Stainless Steel, GP1*) при высоких циклах (10000...100000 млн. цикл) увеличивается до 100 % после процесса ППД (при режимах: P от 1000 до 2000 Н; V от 50 до 150 м/мин; S от 0,05 до 0,1 мм/об; $R_{пр}$ от 2,5 до 5 мм) по сравнению с образцами, испытанными после механической обработки (без ППД); увеличение составило 20 %.

7. Полимеры. Выполнен анализ исследований [36-42], посвященных изучению качества поверхности полимеров после обкатывания шариковым деформирующим инструментом (P от 50 до 150 Н). Результаты, полученные в работах [36-42], свидетельствуют о значительном снижении шероховатости (до Ra 0,3-0,4 мкм) образцов из полимеров и позволяют предполагать, что процесс ППД шариками имеет хорошие перспективы для внедрения в качестве нового метода обработки поверхности полимеров (рис. 1.2).

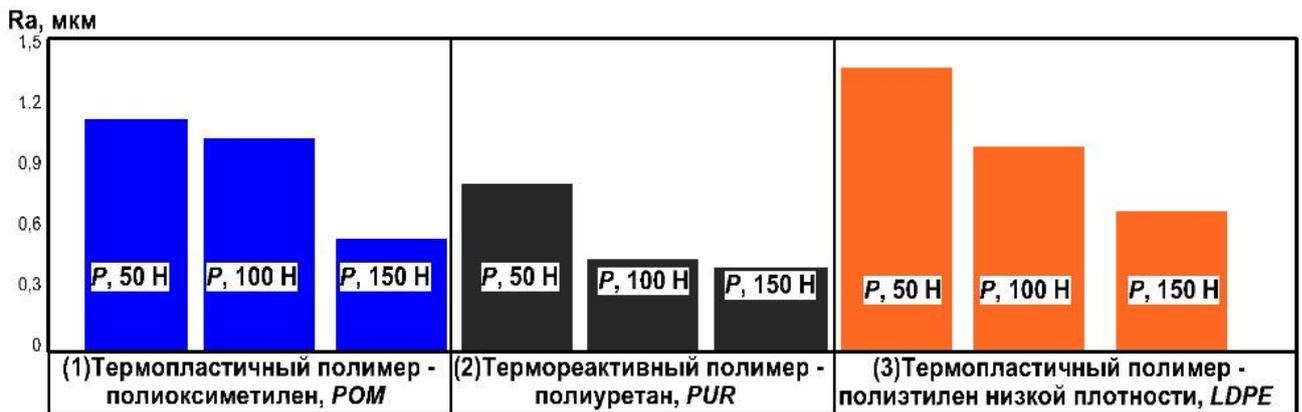


Рисунок 1.2 Распределение параметра шероховатости (Ra , мкм) полимеров после ППД в зависимости от усилия обкатывания, по результатам (1), (2) – в работе [36]; (3) в работе [39]

Анализируя научные публикации в области ППД в мире в период с января 1990 года по май 2022 года в основных коллекциях: *Web of Science, Scopus, Elsevier, Springer, Wiley, IEEE, Emerald insight, Elibrary*, РГБ, КиберЛенинка, можно выделить следующие сложившиеся направления исследований (рис. 1.3):

1. Оптимизация параметров качества поверхностного слоя после ППД. Исследователи устанавливают взаимосвязи между параметрами процесса обкатывания (подача, усилие, скорость и др.) и получаемым качеством поверхностного слоя, с помощью экспериментальных исследований, создания математических, кинетических моделей и конечно-элементных моделей и др. [43-45].

2. Исследование микроструктуры после ППД [46-48].

3. Исследование влияния ППД на сопротивление усталости [49-51], коррозионную стойкость [52-54], износостойкость [55-57].
4. Исследование совмещенных и комбинированных методов ППД [58-62].
5. Разработка новых способов, устройств и деформирующих инструментов для ППД [63-77].
6. Исследование возможностей интенсификации процессов ППД [78-81].
7. Разработка феноменологических, математических, кинетических и адекватных конечно-элементных моделей процессов ППД (подраздел 1.2 данной работы).



Рисунок 1.3 Направления исследований процессов ППД

С 1990 по 2022 год исследования в области ППД достигли значительного прогресса. Библиометрический анализ позволил выявить основные темы исследований в области ППД (табл. 1.1).

Таблица 1.1 Перечень тем исследований в области ППД с 1990 по 2022 год

Темы исследований в области ППД			
с 1990 по 2000 годы	с 2001 по 2010 годы	с 2011 по 2015 годы	с 2016 по 2022 годы
1) изучение влияния ППД на процессы трения и износа; 2) тоже на микроструктуру поверхностного слоя; 3) тоже на параметры шероховатости поверхности деталей и свойства в условиях	1) изучение влияния ППД на остаточные напряжения и усталостные характеристики; 2) тоже на шероховатость, твердость поверхностного слоя и износостойкость;	1) изучение влияния ППД на коррозионную стойкость; 2) тоже на перекристаллизацию и пластичность; 3) выполняли оптимизацию параметров поверхностного слоя после ППД.	1) изучение влияния эволюции микроструктуры после ППД на механические свойства деталей; 2) тоже на качество поверхностного слоя, усталостные, коррозионные и износостойкие характеристики;

приложения усталостных нагрузок.	3) тоже на пластическую деформацию, микроструктуру и рекристаллизацию металла.		3) разработка 2D, 3D конечно-элементных моделей процессов ППД; 4) оценка возможности интенсификации процессов ППД; 5) изучение влияния ППД сложнопрофильными инструментами на качество поверхностного слоя детали.
----------------------------------	--	--	--

Анализ исследований [82-93] позволил получить представления о закономерностях формирования качества ПС в зависимости от режимов обработки. Управление параметрами качества ПС требует знания закономерностей непрерывного изменения свойств, как на операциях технологического процесса упрочняющей механической обработки детали, так и на стадии эксплуатации. Важно отметить, что полученные в ПС свойства на предыдущих операциях изготовления детали, влияют на формирование свойств ПС при последующих операциях.

Такой подход к оценке качества поверхностного слоя учитывает явление технологического наследования (ТН) [83]. Анализ исследований [83, 94-96] подтверждает проявление ТН на стадиях механической обработки и эксплуатации деталей машин.

Установлено, что некоторые из параметров действуют положительно на эксплуатационные свойства обработанных поверхностей, а некоторые – отрицательно. По мнению авторов, необходимо ослабить действие отрицательных факторов с помощью технологических средств.

Авторами показано, что при обработке ППД ключевыми факторами, снижающими шероховатость поверхности, являются: усилие, зависящее от свойств обрабатываемого материала; геометрические параметры деформирующего элемента (ДЭ); число (ДЭ); число рабочих ходов; скорость обработки, влияющая в меньшей степени. На рис.1.4 представлены графики зависимости шероховатости обкатанной поверхности от исходной шероховатости по данным [97-108].

Так, в работе [99] установлено, что увеличение количества ДЭ на обкатывающем ролике (до двух профильных радиусов) приводит к снижению параметров шероховатости Ra в 3,5 раза (рис. 1.4, кривая 3), увеличению твердости на 6-8%, возрастанию остаточных сжимающих напряжений в ПС в 1,2-1,5 раза, увеличению микротвердости, но к меньшей глубине упрочнения.

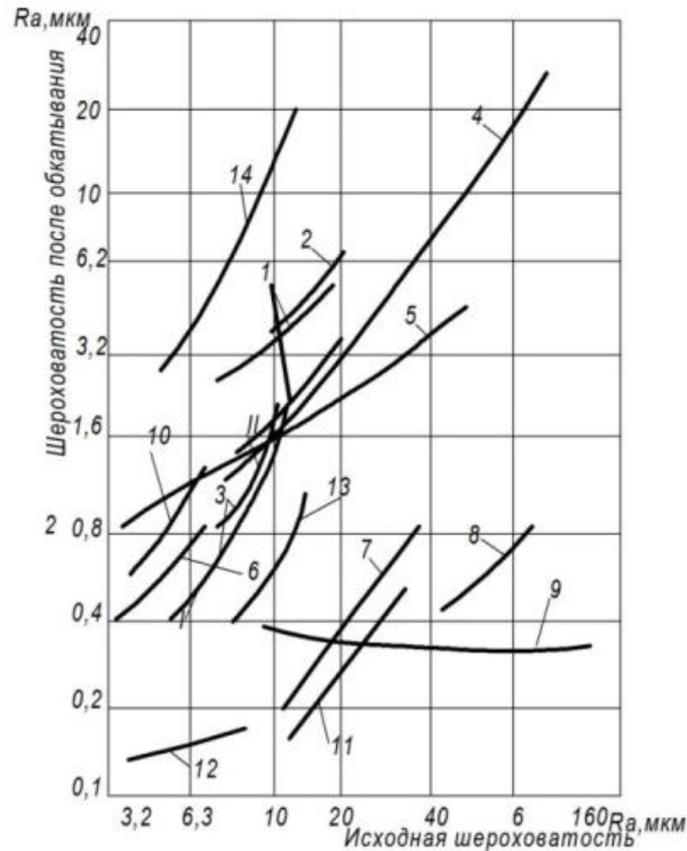


Рисунок 1.4 Графики зависимостей шероховатости обкатанной поверхности от исходной шероховатости по данным: 1 – Дальского А. М., Косиловой А. Г [97]; 2 – Дудникова А. А. [98]; 3 – Кьонга Н. К, Зайдеса С. А. (I – обкатывание двухрадиусным роликом; II – обкатывание однорадиусным роликом [99]); 4 – Киричека А. В. [100]; 5 – Вулых Н. В. [101]; 6 – Шнейдера Ю. Г. [102]; 7 – Ветрова Е. А. [103]; 9 – Кугультинова С. Д. [104]; 10 – Гурова Р. В. [105]; 11 – Зайдеса С. А., после реверсивного ППД [106]; 12 – Pahlitsch G. [80]; 13 – Abrao A. M., Denkena B. и др. [107]; 14 – Rodriguez A. и др. [108]

Анализ результатов исследований шероховатости и волнистости в работах [109-124] для разных групп сталей показал, что при исходных значениях параметра Ra 0,65-0,85 мкм, обработка ППД (при варьируемых режимах: P от 50 до 2500 Н; n от 500 до 1400 об/мин; S от 0,032 до 2,0 мм/об; $R_{пр}$ от 1,5 до 10 мм) традиционным и шариковыми или роликовыми инструментами позволяет значительно снизить параметр Ra : для углеродистых сталей до 0,20-0,29 мкм (рис. 1.5, а); до 0,12-0,3 мкм для низкоуглеродистых сталей (рис. 1.5, б); до 0,067-0,24 мкм для инструментальных сталей (рис. 1.5, в); до 0,05-0,18 мкм для нержавеющей сталей (рис. 1.5, г).

Лио Н. в работе [124] при обкатывании образцов \varnothing 30 и 45 мм из цветных сплавов (алюминиевый LY12 и латунный H62) ДЭ с профильным радиусом 1 мм установлено, значительное снижение волнистости (W_{max} до 0,025-0,035 мкм, при исходной 0,4 мкм) (рис. 1.5, д).

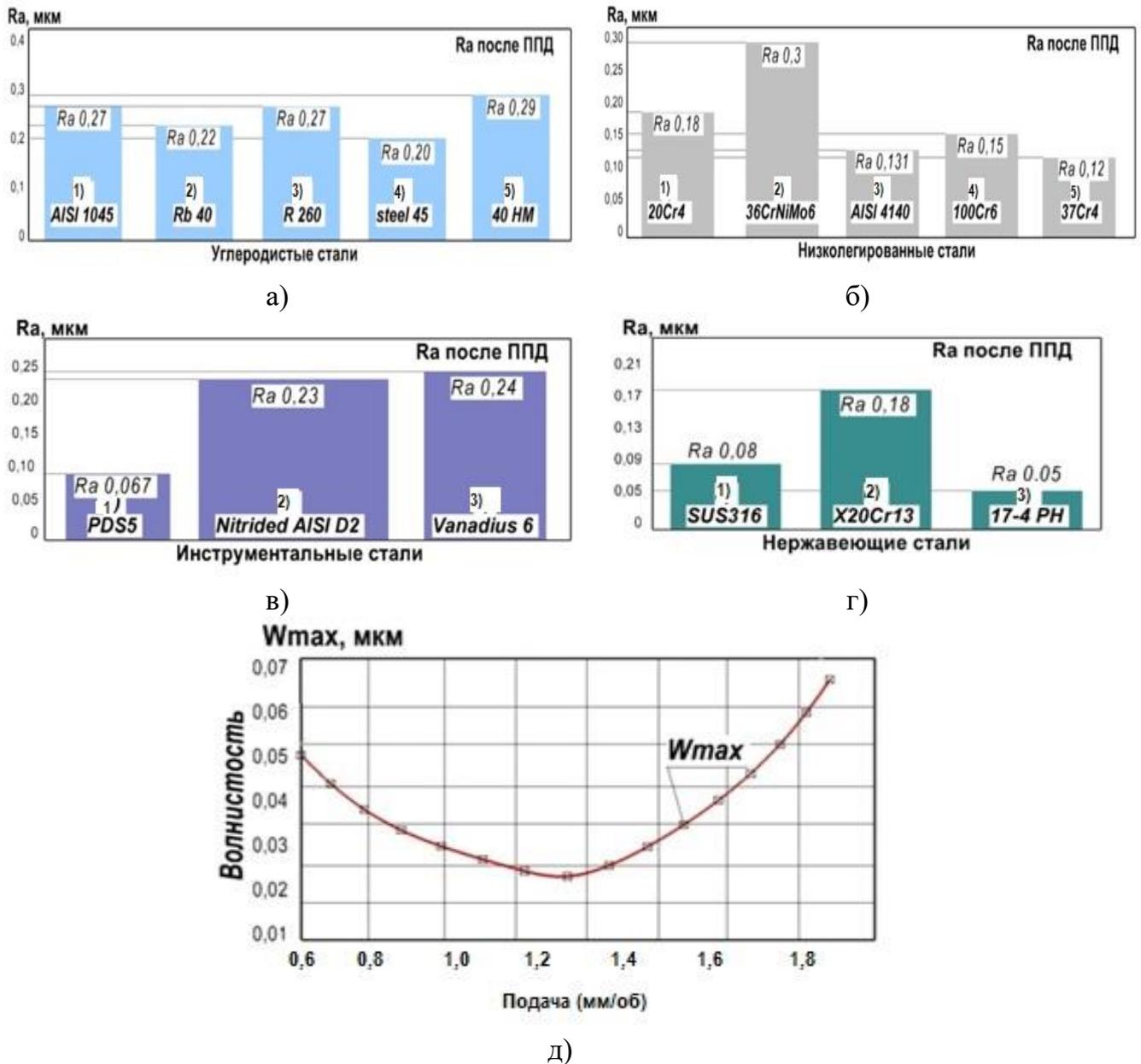


Рисунок 1.5 Гистограммы шероховатости после ППД: а) для углеродистых сталей, по данным: 1 – *Lin Y. C.* с соавторами [109]; 2 – *Hamadache H.* с соавторами [110]; 3 – *Maximov J.* с соавторами [111]; 4 – *Radziejewska J., Skrzypek S. J.* [112]; 5 – *Swirad S.* [113]; б) для низколегированных сталей, по данным: 1 – Кузнецова В. П. с соавторами [114], 2 – *Hamadache H.* с соавторами [115], 3 – *Hankare A. V.* с соавторами [116], 4 – *Liska J.* с соавторами [117], 5 – *Maximov J.* [118]; в) для инструментальных сталей, по данным: 1 – *Chen C. H., Shiou F. J.* [119], 2 – *Toboła D.* с соавторами [120], 3 – *Toboła D., Kania B.* [121]; г) для нержавеющей сталей, по данным: 1 – *Tanaka H.* с соавторами [122], 2 – Кузнецов В. П. [114], 3 – *Sachin B.* с соавторами [123]; д) влияние подачи на волнистость поверхности образца из латуни (H62), по данным *Luo H* [124]

Известно, что в результате ППД упрочненная (наклепанная, деформированная) область, определяется измерением твердости или микротвердости по глубине упрочненного слоя. Изменение твердости/микротвердости характеризует степень упрочнения (1.1):

$$HV = \frac{HV - HV_{исх.}}{HV_{исх.}} \times 100\%, \tag{1.1}$$

где HV - микротвердость после ППД; $HV_{исх.}$ – исходная микротвердость металла.

Установлено, что методом ППД возможно значительное увеличение микротвердости (300...600 HV) конструкционных сталей. При этом характер изменения твердости поверхностного слоя после ППД зависит от режимов обработки и свойств обрабатываемого металла. Также, анализ показал, что метод ППД в значительной степени увеличивает микротвердость и глубину упрочнения углеродистых, низколегированных, инструментальных, нержавеющей сталей (рис. 1.6, а, в-д) [109-124].

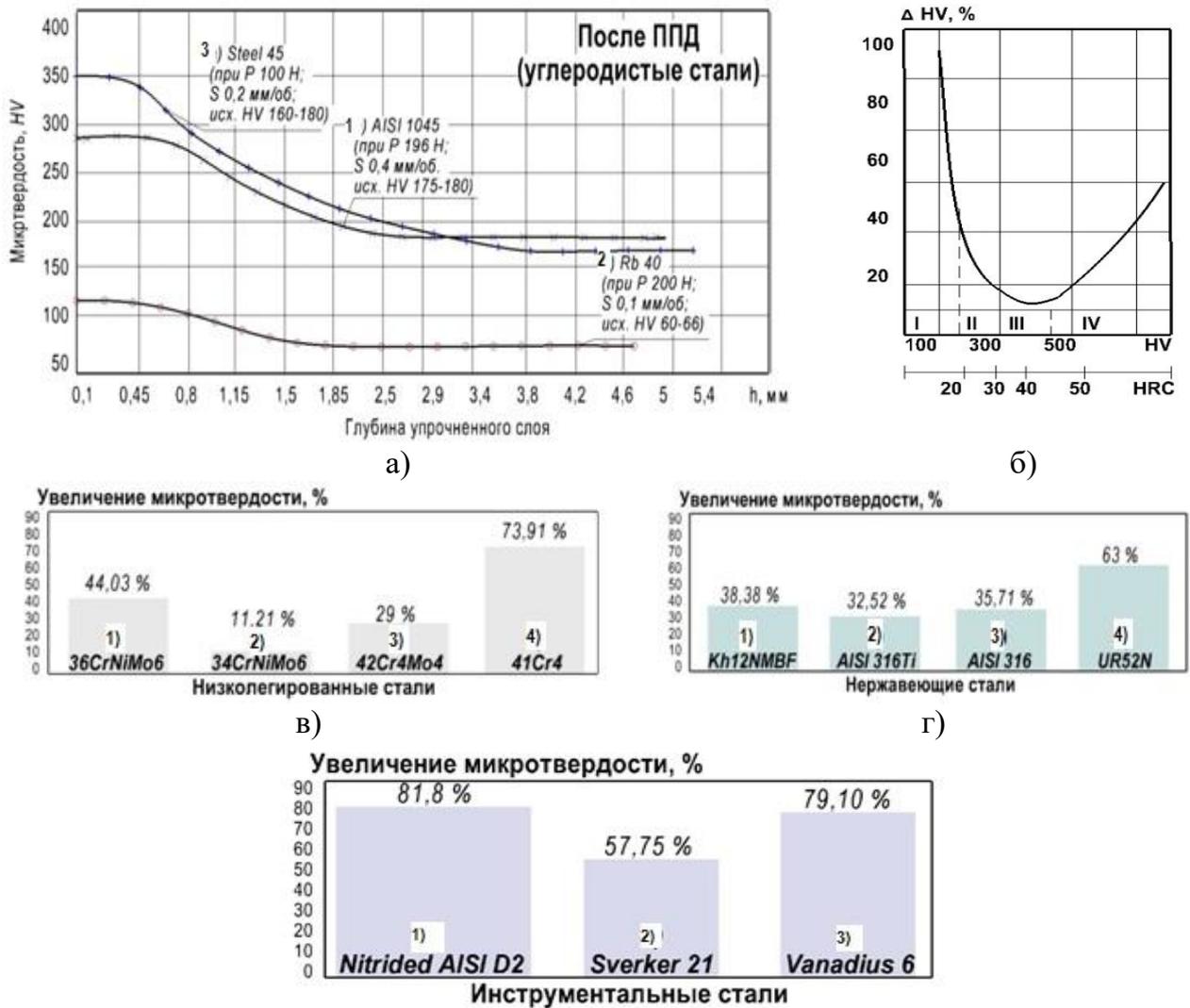


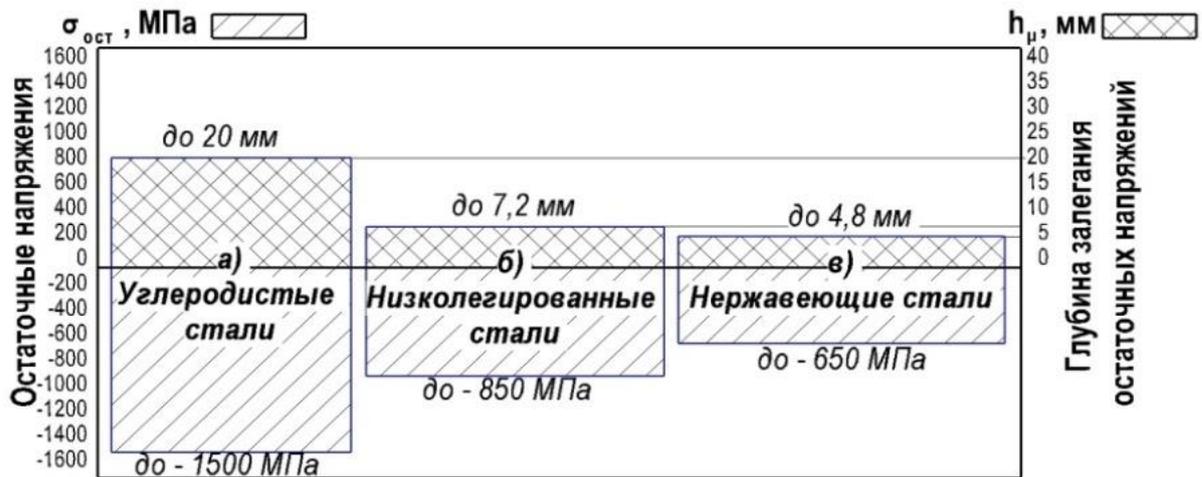
Рисунок 1.6 Графики изменения микротвердости после ППД: а) для углеродистых сталей, по данным: 1 – Lin Y. C. [109]; 2–Hamadache H.[110]; 3 – Radziejewska J.[112]; б) относительное увеличение твердости углеродистых и легированных сталей при пластическом деформировании в различных структурных состояниях [125]: I– феррит и феррит+перлит; II–перлит; III–сорбит; IV–троостит и мартенсит; в) для низколегированных сталей (в %), по данным [114-116]; г) для нержавеющей сталей (в %), по данным [122-123]; д) для инструментальных сталей (в %), по данным [119-121]

Легированные стали менее склонны к упрочнению. Для структур, полученных в результате термической обработки (ТО), наибольшая степень упрочнения достигается у мартенситной структуры с большим содержанием углерода, наименьшая – у сорбитной структуры (рис. 1.6, б) [125].

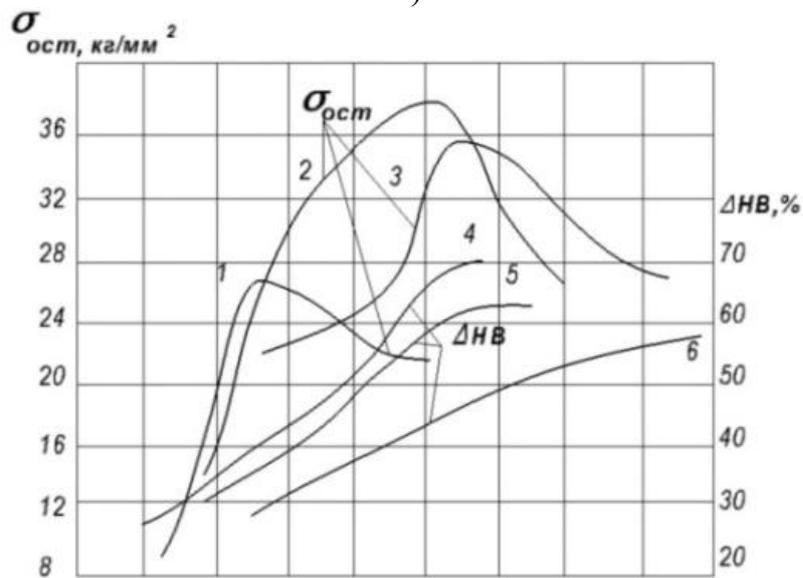
Известно, что упрочнение ППД сопровождается появлением в ПС обрабатываемого металла сжимающих напряжений (до -1500 МПа, рис. 1.7, а), что в свою очередь, замедляет рост усталостных трещин и приводит к росту сопротивления возникновению пластической деформации в процессе эксплуатации детали. Увеличение усилия обкатывания до некоторой величины приводит к уменьшению шероховатости поверхности, при дальнейшем увеличении усилия шероховатость увеличивается. В тоже время, величина сжимающих остаточных напряжений увеличивается до тех пор, пока не будет достигнут предельный уровень, который обычно определяется пределом текучести материала. При этом дальнейшее увеличение усилия способствует распространению сжимающих напряжений по глубине образца и увеличением твердости. Так, в работе Мартыненко О. В. установлено, что увеличение профильного радиуса ($R_{пр}$ 5, 12 и 24 мм) и усилия обкатывания ролика приводит к увеличению сжимающих остаточных напряжений (рис.1.7, б) [126].

Браславским В. М., при обкатывании крупных деталей установлен ряд закономерностей [127]. Показано, что с увеличением профильного радиуса ролика ($R_{пр}$ от 50 до 100 мм) глубина упрочнения уменьшается на 60 %, так как при этом увеличивается площадь контакта, усилие деформирования распределяется по большей площади, соответственно среднее давление в контакте уменьшается. Высокая степень деформации может быть получена при обкатывании роликами бочкообразной формы диаметром (12,5мм) и профильным радиусом ($R_{пр} = 100$ мм) при обкатывании валов ($\varnothing 220$ мм) из стали 40 [127]. Увеличение радиуса кривизны ролика (до 250 и 600 мм) в осевом сечении уменьшает угол вдавливания, и, как следствие, способствует повышению качества обкатанной поверхности.

При этом увеличивается размер отпечатка в контактной зоне, в направлении подачи, следовательно, может быть повышена производительность ППД. Увеличение подачи до некоторой величины (0,8 мм/об) вызывает возрастание глубины и степени упрочнения (до 40%), а при дальнейшем ее увеличении характеристики упрочнения снижаются – происходит пластическое разрыхление материала [127].



а)



б)

Рисунок 1.7 Остаточные напряжения (ОН) после ППД: а) ОН и глубина их залегания, для углеродистых, низколегированных и нержавеющей сталей, по данным [109-111; 114, 116; 122]; б) график зависимости ОН (кривые 1,2,3,) и приращения твердости (кривые 4,5,6) при $R_{пр}$ 5 мм (кривые 1,4); 12 мм (кривые 2,5); 24 мм (кривые 3,6)[126]

Бобровским В. М. с соавторами [128] установлено, что увеличение числа рабочих ходов обкатывающего инструмента при реверсивной деформации приводит к снижению параметров шероховатости Ra и Rz на 45%, твердость и характер ее распределения по глубине упрочненного слоя остаются неизменными, величина сжимающих ОН на поверхности детали снижается. Тем самым, обработка ППД позволила снизить износ поверхности детали на 63%.

Выявлено, что рассмотренные выше традиционные схемы обработки ППД с применением шарика или ролика имеют ограниченный диапазон изменений параметров механического состояния металла ПС: например, отсутствует возможность повышения

упрочняющего эффекта без разрушения ПС. Данные ограничения связаны с технологическими параметрами режима обработки, в том числе, с формой рабочего профиля обкатного инструмента. По мнению автора, расширить возможности ППД можно за счет создания новых способов обработки, которые могут интенсифицировать напряженно-деформированное состояние в очаге деформации и тем самым повысить уровень упрочнения и сжимающих остаточных напряжений без разрушения поверхностного слоя детали (рис. 1.8).



Рисунок 1.8 Схема направлений интенсификации процессов ППД

Автор полагает, что к направлениям интенсификации процессов ППД можно отнести (рис. 1.8):

1. Рациональное использование запаса пластичности металлов и сплавов в условиях различных схем нагружения [129-130].
2. Установление закономерностей пластического течения металла в очаге деформации [131].
3. Разработку и реализацию методов интенсивной пластической деформации (ИПД) [132-134].
4. Разработку совмещенных методов ППД, позволяющих путем концентрации операций в одной наладке, уменьшать машинное время, существенно повышая производительность труда [135-138].

В настоящее время для современных промышленных предприятий актуально и экономически выгодно совмещать традиционные механические методы обработки (точение, сверление, фрезерование) с другими, например, чистовыми методами обработки, с целью уменьшения и (или) нивелирования недостатков одной из операций обработки и достижения более высокой точности и качества поверхности детали [135-138].

Два различных способа обработки могут быть объединены в единую технологическую операцию, в которой положительные стороны обеих составляющих процессов могут быть использованы совместно. Так, например, метод размерного совмещенного обкатывания (PCO) [137] позволяет удалить материал заготовки и одновременно с этим упрочнить деталь и получить поверхность с минимальной шероховатостью.

К достоинствам совмещенных методов ППД относятся: лучшая обрабатываемость материала заготовки; более длительный срок службы инструмента; снижение усилия резания; лучшее качество поверхности; повышение эффективности (трудоемкость, себестоимость) обработки; возможность одновременной наладки, контроля связи двух инструментов (резца и ролика), которыми можно управлять одновременно; одновременное воздействие двух инструментов (резца и ролика) в зоне обработки активизирует значительные изменения на микроструктурном уровне.

5. Разработку комбинированных методов ППД, основанных на использовании различных по физической сущности методов упрочнения, например, сочетающие термическую и механическую обработку, нанесение покрытий и диффузионный отжиг, нанесение покрытий и поверхностное пластическое деформирование и др. [139-145].

6. Разработку новых схем нагружения поверхностного слоя, предполагающих интенсификацию напряженно-деформированного состояния очага деформации, с применением новых устройств и сложнопрофильных деформирующих инструментов.

Создание сложнопрофильных деформирующих инструментов для ППД направлено на то, чтобы, во-первых, интенсифицировать напряженно-деформированное состояние в очаге деформации с целью измельчения структуры, увеличения микротвердости и пластичности без разрушения поверхностного слоя, и, во-вторых, для нивелирования одностороннего (точечного) давления деформирующего инструмента (шарика или ролика) на обрабатываемую поверхность детали, что в результате повысит эффективность метода ППД за один рабочий ход инструментов. На практике наиболее широко используются «мультироллеры» или «мультиболлы», работающие с сжимающими пружинами

[146-154]. Это связано с возникающей в результате более равномерной пластической деформацией, как в радиальном, так и в осевом направлениях при ППД стальных заготовок с неравномерной твердостью. Важно отметить, что при разработке новых схем нагружения поверхностного слоя, способов ППД, деформирующих инструментов, важно создавать многомасштабные имитационные модели для более точного конечно-элементного моделирования процессов ППД. Из-за отсутствия экспериментальных данных по новым способам, устройствам и деформирующим инструментам для ППД невозможно предположить, как будет формироваться поверхностный слой, а также механические характеристики материалов. Кроме того, важно исследовать закономерности изменения структуры на разных масштабных уровнях (макро-, мезо- и микроуровнях) после ППД новыми способами. Одновременно с этим, необходимо изучать усталостные, коррозионные и износостойкие свойства обрабатываемых материалов в различных условиях эксплуатации и объяснить, как улучшается качество поверхностного слоя с использованием новых способов, устройств, деформирующих инструментов ППД и насколько такая обработка увеличивает долговечность изделия.

Анализ позволил установить, что традиционные схемы обработки ППД с применением шарика или ролика исчерпали свои технологические возможности и имеют ограниченный диапазон изменений параметров механического состояния металла ПС: например, отсутствует возможность повышения упрочняющего эффекта без разрушения ПС детали. Данные ограничения связаны с технологическими параметрами режима обработки, например, невозможности применения больших усилий обкатывания (2500-4500 Н); формой рабочего профиля обкатного инструмента, в том числе отсутствием возможности задавать большие действительные натяги (более 0,1 мм) на деформирующий элемент.

Основываясь на библиометрическом анализе достижений в области ППД за последние 30 лет, автор предполагает, что нивелировать данные технологические ограничения и расширить возможности метода ППД можно путем интенсификации процессов поверхностного пластического деформирования, в том числе создавая новые схемы нагружения очага деформации.

В связи с этим необходимо провести анализ теории процессов ППД, в том числе существующих феноменологических, математических, кинетических и конечно-элементных моделей процесса.

1.2 Анализ феноменологических, математических, кинетических и конечно-элементных моделей процессов ППД

Как было отмечено выше, для повышения долговечности деталей необходимо разрабатывать новые, благоприятные схемы нагружения ПС методами ППД. Для этого необходимо выполнение теоретического анализа процессов, а также разработка аналитических и расчетных моделей, учитывающих более широкий диапазон действующих в процессе обработки факторов.

Для этого исследователями при моделировании механического состояния металла в процессах ППД применяются различные подходы; авторы разрабатывают феноменологические [82, 83, 155-156], математические [157-160], кинетические [161-162], конечно-элементные модели (МКЭ) процессов ППД [163-169] и др.

Смелянским В.М. разработана механическая теория процесса ППД, в том числе: решена научная проблема повышения качества при упрочнении деталей машин ППД; разработана схема возникновения ОД (рис.1.9) и установлены закономерности формирования контактных и внеконтактных зон ОД; проведено моделирование НДС очага деформации; раскрыты закономерности формирования ПС деталей машин с позиций механики пластически деформируемых сред; разработаны и практически реализованы методы совершенствования технологии ППД на основе управления процессом деформирования [82-83].

Схема Смелянского В. М. (рис. 1.9) рассматривается в осевом сечении вала, в котором расположена плоскость главных деформаций.

Согласно схеме (рис. 1.9, а) при ППД традиционным деформирующим инструментом (ДИ) (роликом или шариком), на этапе внедрения ДИ в поверхностный слой детали, в зоне контакта возникает ассиметричный очаг деформации (ОД), который можно описать характерными линиями:

- криволинейной линией ABC , описывающей переднюю внеконтактную поверхность очага деформации;
- криволинейной линией CDE , описывающей контактную поверхность очага деформации;
- криволинейной линией EF , описывающей заднюю внеконтактную поверхность очага деформации;

— криволинейной линией FGA , описывающей границу зоны пластического течения металла. Левее этой линии металл находится в упругом состоянии, правее – в состоянии пластического течения. Точка G соответствует наибольшей глубине распространения пластической деформации;

— криволинейной линией GF , вдоль которой заканчивается пластическое течение металла [82-83].

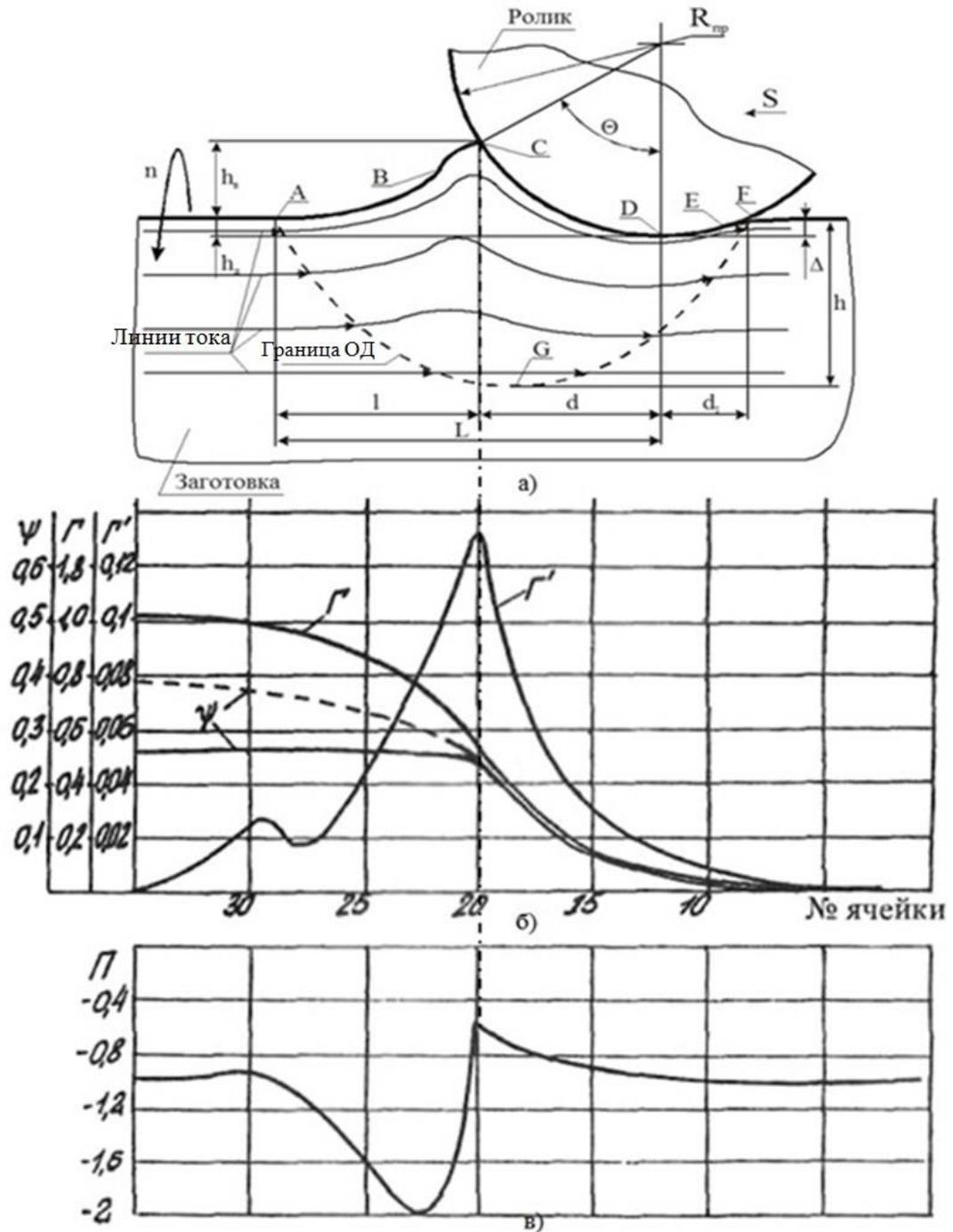


Рисунок 1.9 Феноменологическая модель процесса обработки ППД и возникновения очага деформации (ОД) по данным Смелянского В. М. [82]: а) схема ОД; б) распределение параметров деформированного состояния; в) распределение параметров напряженного состояния

Общая длина L очага деформации состоит из передней внеконтактной поверхности очага деформации ABC (имеющую длину l), контактной поверхности CD (имеющую длину d), и задней поверхности DEF длиной d_1 (рис. 1.9, а). В тоже время, упруго-пластическое восстановление металла Δ за роликом образует заднюю поверхность DEF (рис. 1.9, а). При этом, размеры и форма ОД, определяется свойствами обрабатываемого материала и параметрами режима обработки [82-83].

Также, на схеме очага деформации (рис. 1.9, а) выделены следующие характерные параметры: h_d – действительный натяг, равный глубине внедрения инструмента; h_b – высота упруго-пластической волны перед деформирующим инструментом; $h_p = h_d + h_b$ – расчетный натяг, равный вертикальной проекции передней дуги контакта. Частицы металла в ОД перемещаются вдоль некоторых линий пластического течения металла – линий тока, в результате чего формируется упрочненный слой на глубину h (рис. 1.9) [82].

Согласно модели, движение частицы металла в ОД осуществляется по линии тока, взятой на определенной глубине и определяемой из решения задач механики. Перемещаясь вдоль линии тока, частица металла проходит через три состояния: начальное, текущее конечное. В начальном состоянии условная частица металла, до встречи с передней границей очага деформации (криволинейная ABC , рис. 1.9, а), имеет исходный предел текучести при сдвиге k и нулевое значение таких механических параметров, как: накопленная деформация сдвига Γ (рис. 1.9, б); степень исчерпания запаса пластичности Ψ и других.

Текущее состояние частицы внутри ОД определяется: тензорами этапных приращений деформаций $\Delta\varepsilon(x, y)$ и пластических напряжений $\sigma(x, y)$; приращением интенсивности деформаций сдвига Γ , степенью исчерпания запаса пластичности $\Psi(x, y)$, степенью деформации сдвига Γ и этапными значениями остаточных напряжений $\sigma_{ост}$ (рис. 1.9, в). Конечные параметры состояния частицы будут определяться значениями: Γ , Ψ и $\sigma_{ост}$, накопленными ею к моменту выхода из ОД [82-83].

Кроме того, Смелянским В. М. впервые выполнен полный анализ сложного напряженно-деформированного состояния (НДС) очага деформации, который показал, что при достижении среднего нормального напряжения в очаге деформации $\sigma = -1500$ МПа (в зоне CDG , рис. 1.9, а) накопленная интенсивность деформаций сдвига составила $\Gamma = 1,10$, а степень исчерпания запаса пластичности – $\Psi = 0,28$. При этом до встречи с ро-

ликом накапливается свыше 70% всей деформации, под инструментом в условиях сжатия – 20-25%. Степень исчерпания запаса пластичности в этих зонах составила $\Psi=0,25$ и $\Psi=0,03$ соответственно [82-83]. В дальнейшем, феноменологическая модель Смелянского В. М. была развита Блюменштейном В. Ю. в направлении учета технологического наследования (ТН) [83].

Радченко В. П. и Саушкиным М. Н. [156] предложен феноменологический метод расчета напряженно-деформированного состояния в упрочненном внешнем слое полого цилиндрического образца, основанный на экспериментально выявленной информации о поле остаточных напряжений. В рамках предлагаемой модели, авторами приняты следующие гипотезы: выполняется условие пластической несжимаемости материала; в упрочненном сжатом слое материала не возникают вторичные пластические деформации; пластические деформации в поверхностном слое наводятся таким образом, что они связаны соотношением (1.2):

$$q_z(r) = \alpha q_0(r), \quad (1.2)$$

где $\alpha = const$ ($0 < \alpha < +\infty$) - параметр деформационной анизотропии поверхностного упрочнения; r, z - составляющие цилиндрической системы координат; q_z, q_0 - компоненты остаточных пластических деформаций.

Ингеманссоном А. Р. [170] с соавторами разработана математическая модель формирования шероховатости при точении с опережающим пластическим деформированием (ОПД). В качестве факторов, определяющих значение функции отклика (Ra), были выбраны: скорость резания, теплопроводность инструментального материала, скорость подачи и коэффициент ОПД (1.3):

$$K_{\text{ОПД}} = \frac{h_n}{t_p}, \quad (1.3)$$

где h_n - глубина наклепанного поверхностного слоя (мм); t_p - глубина резания(мм).

Выведенная авторами формула позволила рассчитать значение шероховатости при традиционном точении и с ОПД, то есть спрогнозировать повышение эффективности процесса резания при изучаемом способе и учесть это в технологическом маршруте обработки. (1.4):

$$Ra = 1,33 \times V^{0,1} \times \lambda^{0,16} \times S_0^{0,4} \times K_{\text{ОПД}}^{-0,04}, \quad (1.4)$$

где V – скорость резания (м/мин); λ – теплопроводность инструментального материала (Вт/м* К); S_0 – продольная подача, мм/об; $K_{\text{ОПД}}$ – коэффициент ОПД.

Korzynski M. [171] разработал аналитическую модель, основанную на микромеханической теории линий скольжения, для корреляции взаимосвязи между шероховатостью поверхности и усилия обкатывания при ППД. В соответствии с предложенной моделью, автором выведена формула, позволяющая прогнозировать изменение шероховатости и учитывающая: механические параметры материала, усилие обкатывания, количество неровностей поверхности на заданной длине, угол неровностей поверхности и геометрические параметры деформирующего элемента (диаметр шарика) (1.5):

$$u = \frac{2PS_n}{\sqrt{\frac{1}{2r_d} + \frac{1}{2R}} \sqrt{2rdRzE1(2\alpha + \sin 2\alpha)}} \ln \frac{2PS_n}{\sigma \pi^3 \sqrt{\frac{9}{16}\pi^2 \frac{1}{2rd} \left(\frac{1-u^2}{\pi E}\right) \frac{r_d+Rp}{r_d^2 R^2}}}, \quad (1.5)$$

где P – усилие; u – прогнозируемое изменение; R – радиус инструмента; S_n – шаг неровностей; E – относительная деформация.

Кузнецовым В.П., Горготцом В. Г. предложен энергетический подход к математическому описанию нелинейной динамики сглаживания поверхностей. Анализ выявляет в системе нелинейное динамическое ядро, определяющее колебательное взаимодействие индентора сглаживающего инструмента с поверхностью. Создан многолистовой фазовый портрет нелинейной динамики упруго сглаживания и на его основе определены границы динамической устойчивости системы (рис. 1.10) [172].

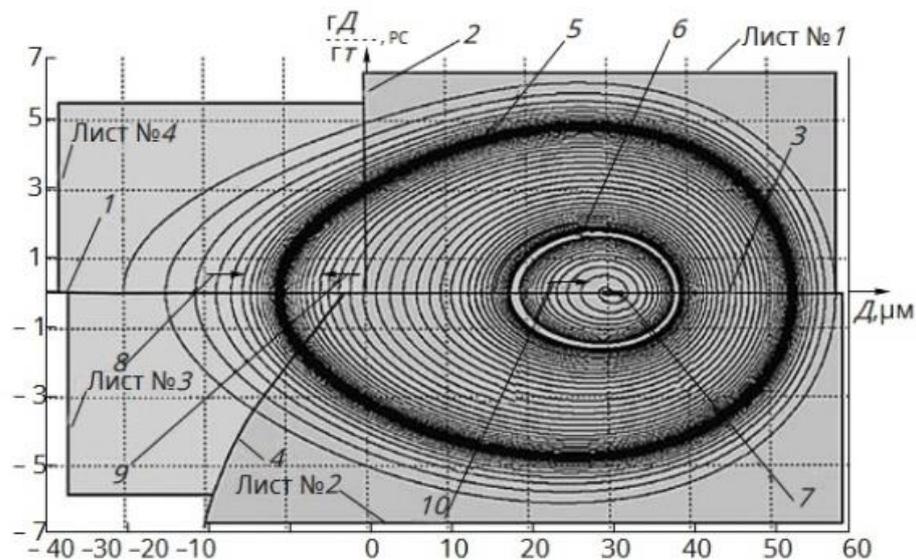


Рисунок 1.10 Фазовый портрет нелинейной динамики упруго-сглаживающей системы, по данным Кузнецова В. П., Горготца В. Г. [172]

Лебедев В. А. и Чумак И. В. на основе структурно-энергетической интерпретации процесса предложили кинетическую модель упрочнения поверхностного слоя деталей при обработке виброударными методами ППД[161]. Модель отражает энергетическую сущность физических явлений, обуславливающих упрочнение поверхностного слоя, и позволяет оценить продолжительность обработки, при которой обеспечивается наибольший эффект упрочняющей обработки с точки зрения повышения эксплуатационных свойств деталей.

Сидякиным Ю. И. и Бочаровым Д. А. предложена кинетическая модель формирования поверхности галтелей крупных валов при ППД роликами [173] (рис. 1.11). В рамках модели предложена методика расчетного определения технологических параметров упрочняющей обработки этих галтелей.

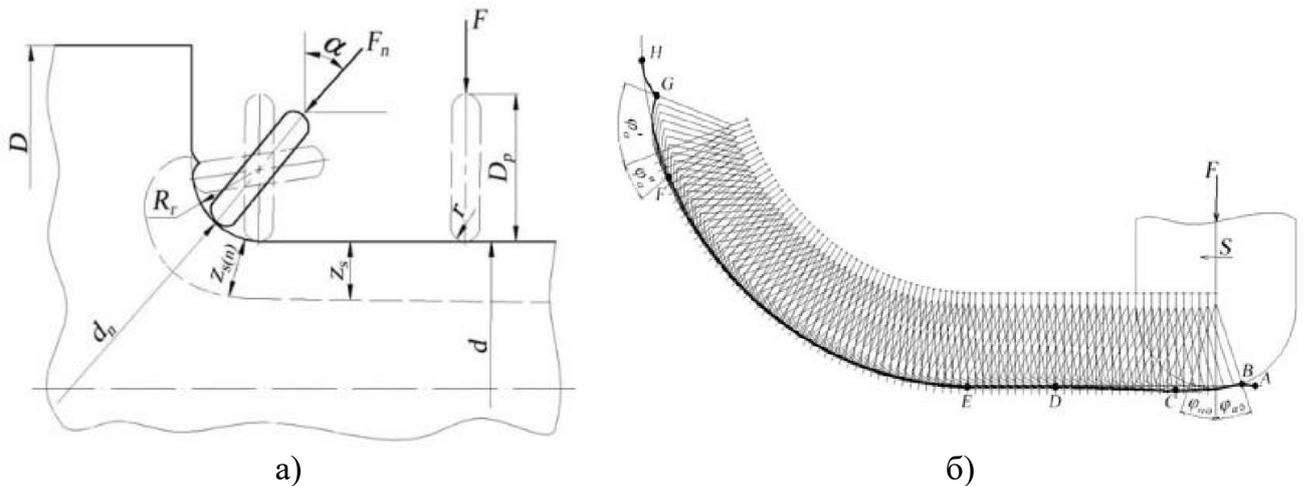


Рисунок 1.11 Кинетическая модель обкатывания участка вала с подачей ролика по профилю галтели[173]: а) кинетическая модель: –рабочая нагрузка, r – радиус профиля ролика, d –диаметр детали, D_p – диаметр ролика в плоскости обкатки, R_r – радиус галтели, $Z_s(n)$ – глубина наклепа, Z_s – заданная глубина деформированного слоя, F_n – усилие обкатывания, обеспечивающее глубину наклепа; б) формирование поверхности при обкатывании роликом галтели постоянной кривизны

Так, согласно предложенной модели, с целью уменьшения шероховатости и обеспечения достаточной степени упрочнения материала подачу инструмента принимают возможно меньшей, при этом учитывают возможный перенаклеп поверхности и ее шелушение (S в пределах 0,12...0,24 мм/об). Усилие обкатывания, обеспечивающее заданную глубину наклепа, рассчитывается по следующей формуле (1.6):

$$F_n = \frac{2\sigma_T Z_s^2(n)}{\frac{1}{\sigma_T} - 1/HD} \quad (1.6)$$

где F_n – усилие обкатывания, обеспечивающее глубину наклепа; H_D – пластическая твердость материала детали (ГОСТ 18835-73); $Z_s(n)$ – глубина наклепа; σ_T – предел текучести.

Как известно, метод конечных-элементов (МКЭ) является эффективной и относительно недорогой альтернативой экспериментам и математическому анализу, позволяя установить величину остаточных напряжений и других показателей НДС в поверхностном слое детали, которые трудно наблюдать и (или) измерить в экспериментах. Однако недостатком КЭ-методов являются присущие им неточности при решении задач с большими пластическими деформациями. В тоже время МКЭ позволяет большинству исследователей использовать его для решения научных и инженерных задач.

Так, в работе Шведовой А. С. [174], разработана КЭ-модель процесса виброударной отделочной обработки шарико-стержневым упрочнителем (ШСУ), позволившая исследовать НДС поверхностного слоя детали (рис. 1.12, а).

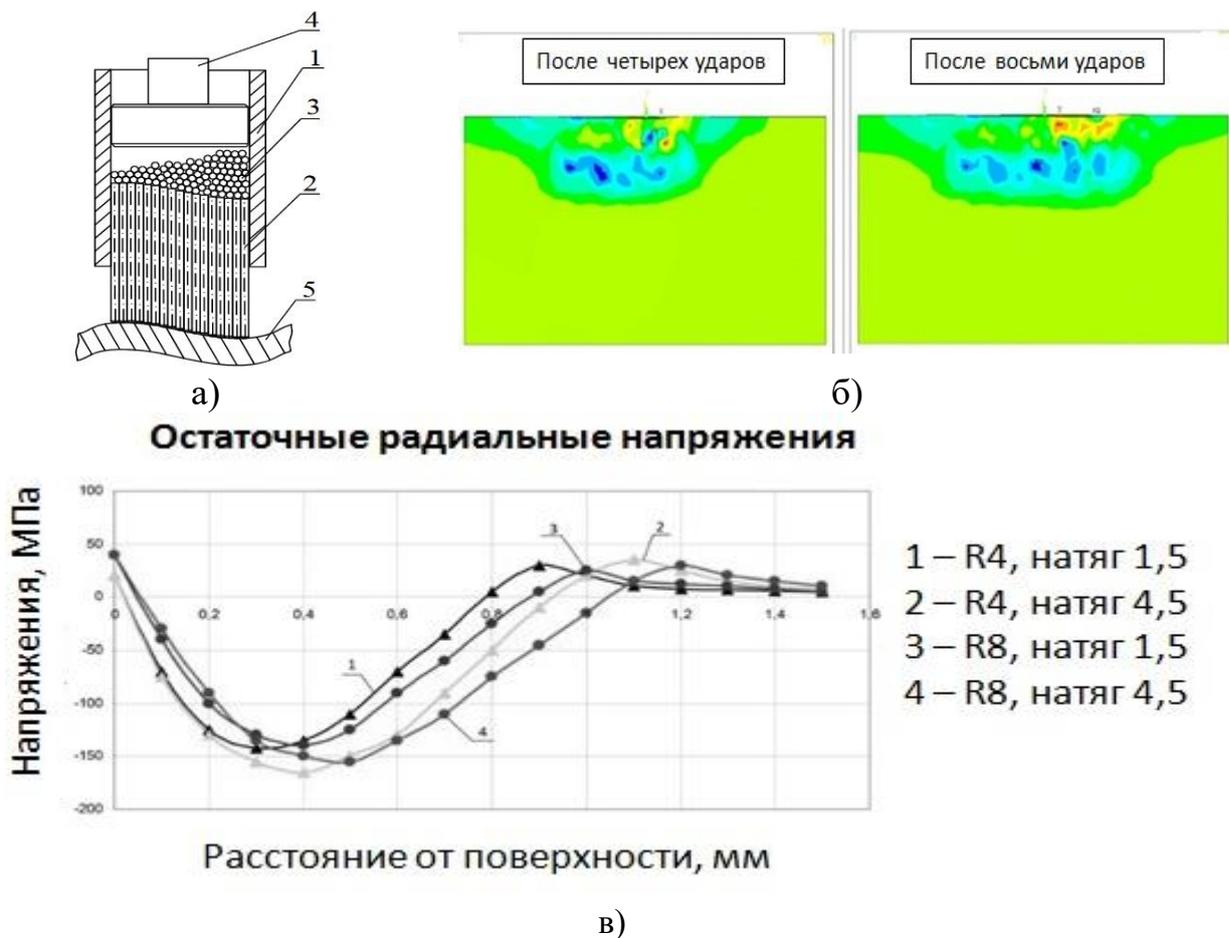


Рисунок 1.12 Схема многоконтактного виброударного инструмента ШСУ [174]: а) схема инструмента: 1 – корпус; 2 – стержни; 3 – стальные шары; 4 – ударник; 5 – деталь; б) эпюры распределения остаточных напряжений после серии последовательных ударов; в) влияние величины натяга и радиуса заточки стержня на распределение остаточных радиальных напряжений

При МКЭ-моделировании в *ANSYS* (рис.1.12, б) единичного и многократного взаимодействия стержней с ПС детали из алюминиевого сплава (В95), широко применяющегося в авиационной промышленности, были получены зависимости остаточных радиальных напряжений от технологических параметров (см. рис. 1.12, в). Результаты МКЭ-моделирования и экспериментальные данные достаточно хорошо коррелируют между собой: остаточные напряжения по экспериментальным данным составляют 130-200 МПа, а по результатам МКЭ-моделирования (-140, -180 МПа); глубина упрочненного слоя по экспериментальным данным составила 0,5 мм, по результатам МКЭ-моделирования 0,4 мм. Полученные эпюры полей напряжений (рис. 1.12, в) показали, что количество ударов незначительно влияет на глубину их залегания, но способствует росту площади распространения напряжений, что позволяет интенсифицировать процесс обработки.

Кузнецовым В. П. с соавторами выполнен ряд исследований, посвященных наноструктурирующему выглаживанию [175], включая численное моделирование процесса выглаживания сферическим инструментом ($\varnothing 2$ мм) образцов из стали 20Х методом подвижных клеточных автоматов ПКА (*Movable Cellular Automata method, MCA*) [176].

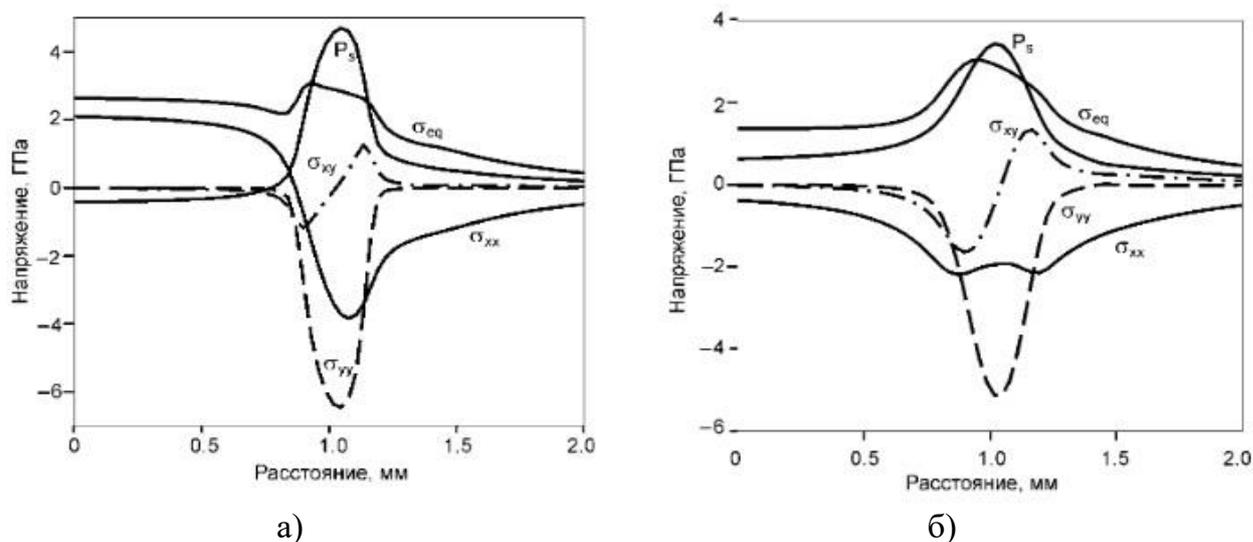


Рисунок 1.13 Результаты МКЭ моделирования ППД шариком, по данным Кузнецова [175]: а) распределение сдвиговых напряжений в очаге деформации и напряжений вдоль двух линий у поверхности (отмечены жирной линией); а) для верхней линии; б) для нижней линии

Авторами выявлены условия, при которых формируется наноструктура в поверхностном слое в процессе выглаживания шариковым индентором (рис. 1.13). Анализ результатов КЭ-модели показал, что при прохождении индентора ПС испытывает сложное напряженно-деформированное состояние, при котором материал испытывает накопе-

ременную нагрузку (от -6 до +7 ГПа), при которой возможно частичное залечивание дефектов металла.

Знание физических закономерностей пластического течения металла позволило разработать процессы резания с опережающим пластическим деформированием (ОПД) [177]. Метод ОПД реализуется за счет изменения физико-механических свойств материала срезаемого слоя путем его предварительного деформирования, осуществляемого в процессе резания дополнительным механическим источником энергии, в качестве которого может быть: обкатывание роликом (рис. 1.14, а) или шариком, наложение ультразвука, чеканка. Для дробления сливной стружки в процессе обработки с ОПД применяют сборный ролик со сменными зубчатыми вставками (рис. 1.14, а), которыми осуществляют насекание лунок на поверхности резания. На рисунке 1.14, б представлена физическая модель процесса стружкообразования при резании с ОПД и обычном резании.

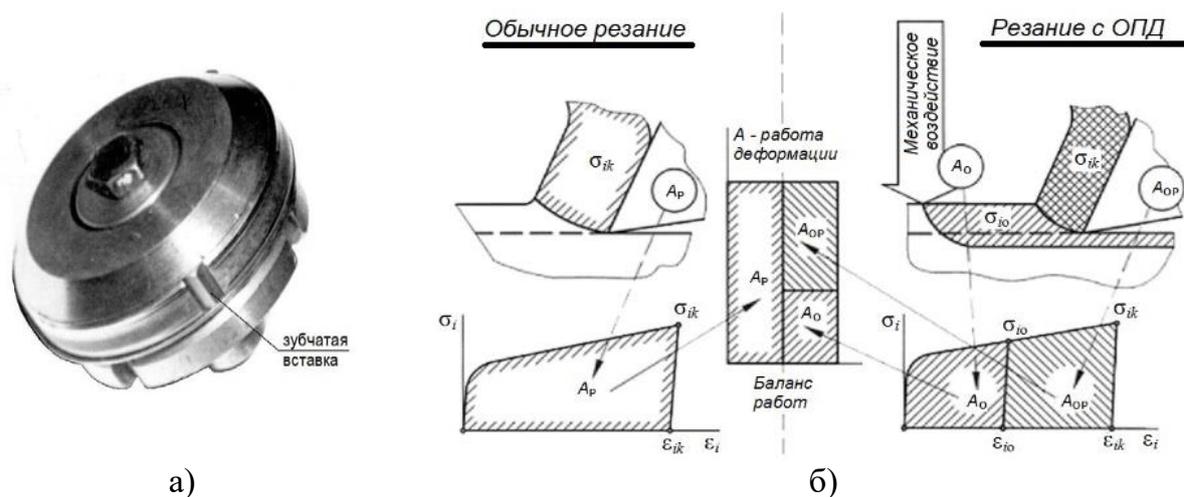


Рисунок 1.14 Инструмент и физическая модель для ОПД [177]: а) фото ролика с зубчатой вставкой для ОПД; б) физическая модель механизма действия ОПД и обычного резания на процесс стружкообразования

Согласно предложенной модели, при обычном резании вся работа пластического деформирования совершается режущим инструментом и количественно выражается площадью A_p диаграммы $\sigma_i - \epsilon_i$ (рис. 1.14, б). В отличие от этого при резании с ОПД часть работы A_o (рис. 1.14, б), затрачиваемой на пластические деформации до значений σ_{i0} и ϵ_{i0} , предварительно выполняется дополнительным механическим источником энергии – устройством ППД. При данном виде обработки величина ОН варьируется в пределах от -250 до -450 МПа. В соответствии с изложенным, предварительная деформация, исчерпывающая часть запаса пластичности обрабатываемого материала, является ме-

ханизмом управления в широких пределах пластическими свойствами срезаемого слоя при резании, изменение которых позволяет активно воздействовать на параметры процесса и результаты обработки.

Зайдесом С.А. разработана модель очага деформации в процессе охватывающего ППД [178] (рис. 1.15). В качестве деформирующего инструмента при этом используют кольцевой индентор – матрицу.

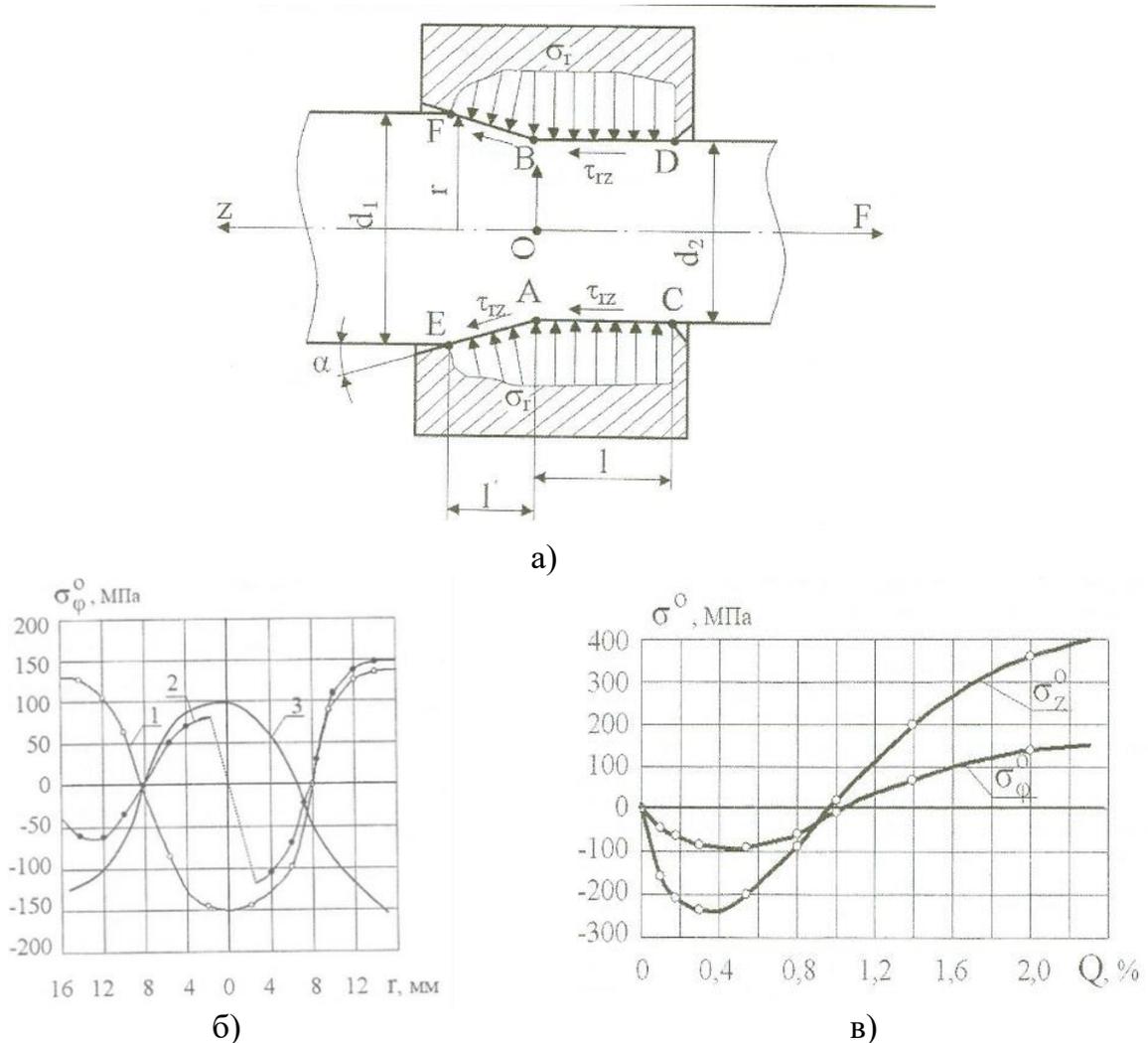


Рисунок 1.15 Охватывающее ППД [179]: а) модель очага деформации при охватывающем ППД; б) распределение тангенциальных остаточных напряжений по поперечному сечению цилиндрических заготовок: 1- до правки; 2 - после правки; 3- после правки и наложения охватывающего ППД; в) влияние степени относительного обжатия Q на максимальную величину осевых, тангенсальных ОН в поверхностных слоях заготовки

Использование охватывающего ППД позволяет нивелировать искривление валов при правке поперечным изгибом. Для расчета ОН автором принята теорем о разгрузке Ильюшина А.А., при этом использованы следующие допущения: касательные напряжения равномерно распределены по длине ОД; упругие и пластические деформации доста-

точно малы, что позволяло применить геометрически линейную теорию деформаций; процесс охватывающего ППД изотермический. Экспериментально установлена величина относительного обжатия ($Q_{45\%}$), при которой устраняются растягивающие остаточные напряжения (от 170 до 430 МПа) на поверхности (после правки) и формируются сжимающие напряжения (от -150 до -250 МПа) (рис. 1.15, б). Таким образом, охватывающее ППД позволяет изменять характеристики формируемого поверхностного слоя в широких пределах, тем самым интенсифицируя процесс.

Также автором предложены следующие модели нагружения ПС: ППД с вращением ролика относительно вертикальной оси (рис. 1.16, а); ППД с вращением двух роликов относительно вертикальной оси (рис. 1.16, б)[179-180, табл. 1.2]. Согласно первой модели, автор предлагает вращать деформирующий ролик не относительно горизонтальной оси, а относительно вертикальной (рис. 1.16, а). В этом случае пластический отпечаток от ролика на поверхности детали представляет собой фигуру в виде эллипса, имеющего большую и малую оси.

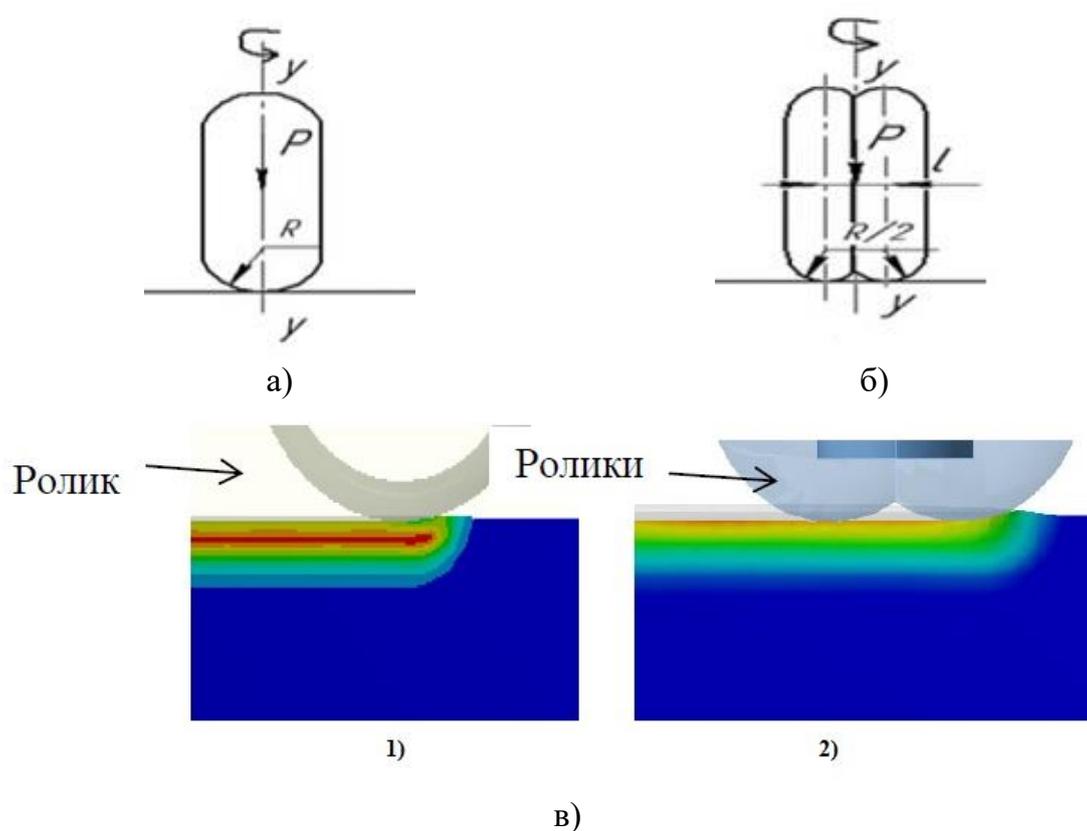


Рисунок 1.16 Модели ППД при различных условиях нагружения ПС (y – y – вертикальная ось вращения [179-180]: а) ППД с вращением ролика относительно вертикальной оси; б) ППД с вращением двух роликов относительно вертикальной оси; в) поля распределения пластических деформаций: 1) ППД с вращением ролика относительно вертикальной оси; 2) ППД с вращением двух роликов относительно вертикальной оси

При вращении ролика вокруг вертикальной оси y – y происходит наложение пластических полей разных ориентаций по направлению, что должно способствовать «перемешиванию» структуры в поверхностном слое. При данном виде обработки радиальный компонент (σ_y) ОН достигают до -397 МПа. Во втором случае, автор предлагает совместить два ролика вместе и вращать их также относительно оси y – y (рис. 1.16, б). В результате, эффективность и интенсивность обработки будет значительно выше, так как в процессе деформирования участвует не два, а четыре очага деформации на каждый оборот ролика. При данном виде обработки осевой компонент (σ_x) ОН достигают до -746 МПа. Остальные численные результаты КЭ-моделей приведены в таблице 1.2.

Уен Y. С. [181] с соавторами разработана конечно-элементная 3D-модель в программном продукте «*DEFORM*» (рис. 1.17) процесса ППД шариком ($\varnothing 6$ мм) образца из подшипниковой низколегированной хромовой мартенситной стали (*AISI52100*). Полученные данные были сопоставлены с результатами МКЭ-моделирования процесса ППД шариком в 2D постановке.

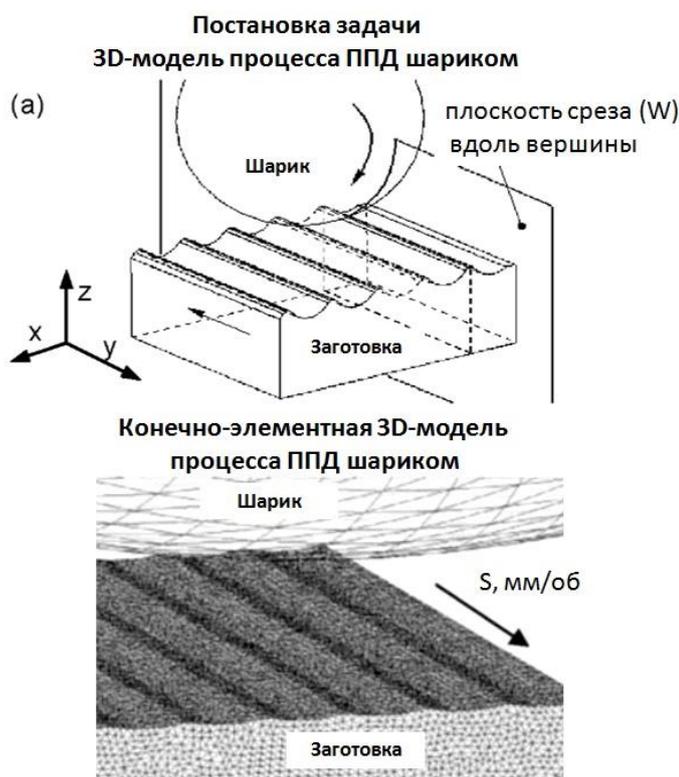


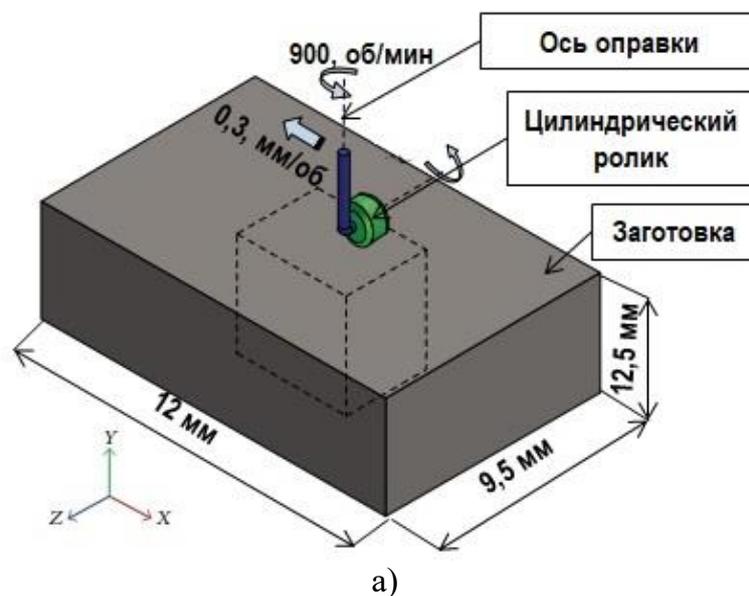
Рисунок 1.17 Постановка задачи и конечно-элементная 3D-модель процесса ППД шариком, по данным Уен Y. С. с соавторами [181]

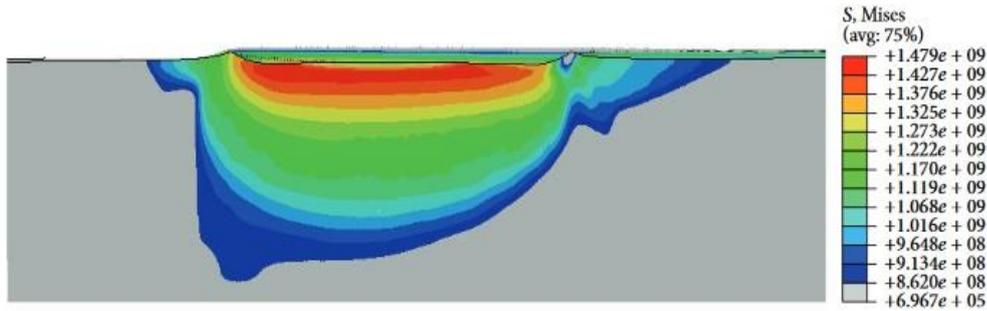
Как в 2D, так и в 3D-модели деформирующий инструмент (шарик) рассматривают как твердый объект, а заготовку – как упругопластический. Использование ПО «*DEFORM*» позволило разбить заготовку на мелкие четырехузловые элементы (8-12

элементов между пиками шероховатости). Согласно постановке задачи, шарик внедрялся в заготовку на глубину 0,028 мм с усилием 1100 Н и перемещался с постоянной скоростью (100 м/мин). В результате авторами установлено, что наибольшие сжимающие напряжения (от -180 до -500 МПа) локализованы на небольшой глубине (0,2-0,4 мм) заготовки. Также, авторы предполагают, что 2D-модель позволяет прогнозировать остаточные напряжения лучше, чем 3D-модель, из-за снятия ограничений на фиксированное смещение узлов на заготовке. В тоже время, 3D-модель показала более реалистичную картину распределения деформаций на поверхности заготовки, а также особенности пластического течения материала.

Сущность интенсификации процессов ППД заключается в интенсификации напряженно-деформированного состояния металла в очаге деформации. Подобное возможно благодаря изменению схемы нагружения поверхностного слоя детали и кинематики рабочего инструмента, которая будет усиливать в том числе искажение зеренной структуры материала.

В работе [182] при решении задачи интенсификации процесса ППД в двухмерном и трехмерном пространстве моделировался процесс обкатывания цилиндрическим роликом по сложной траектории. Движение ролика осуществлялось таким образом, что его ось вращалась вокруг оси оправки, в то время как ролик вращался вокруг своей оси, тем самым создавая интенсивное НДС в поверхностном слое обрабатываемой заготовки (рис. 1.18). Установлено, что наибольшее значение ОН достигает касательный компонент σ_{xy} (до - 500 МПа) (см. табл. 1.2).





б)

Рисунок 1.18 Схема обкатывания цилиндрическим роликом [182]: а) постановка задачи; б) распределение напряжений по Мизесу

Махаловым М.С. разработана КЭ-модель процесса размерного совмещенного обкатывания (PCO) (рис. 1.19, а). Модель состояла из обрабатываемой заготовки и инденторов – ролика и резца, подрезающего волну пластически деформированного металла (рис. 1.19, а).

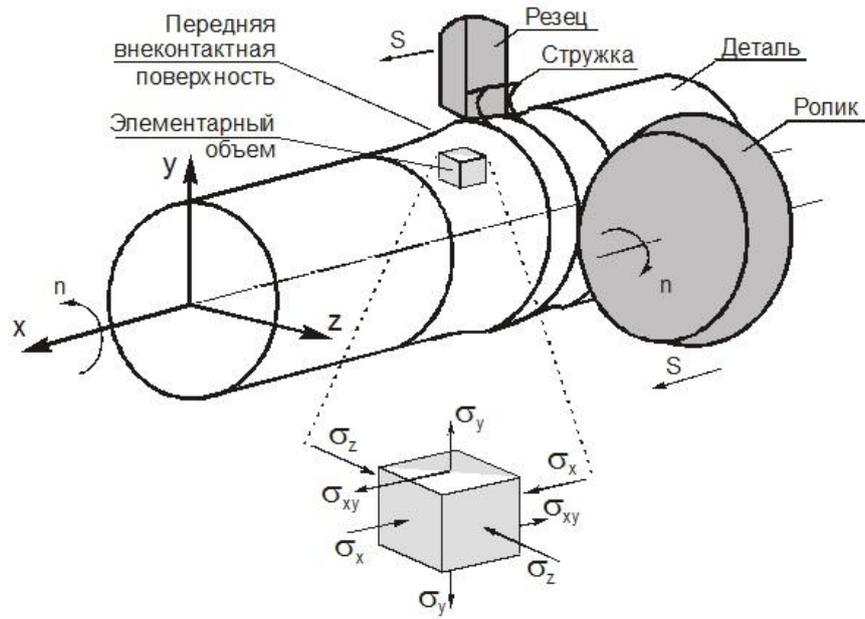
Начальными и граничными условиями для моделирования явились физические и механические свойства металла (сталь 45), режим обработки PCO ($S=0,22$ мм/об; $n=1275$ об/мин; $V=180$ м/мин; $R_{пр}=3$ мм; $HV_{исх}170$; $D_{дет.}=45$ мм), а также форма и геометрические размеры очага деформации.

При решении задачи механики PCO разбиение производилось таким образом, что количество конечных элементов достигало 20000. Наибольшую концентрацию элементов модель имела непосредственно в зоне пластического течения металла в ОД, а также в зоне срезания пластической волны (рис. 1.19, б).

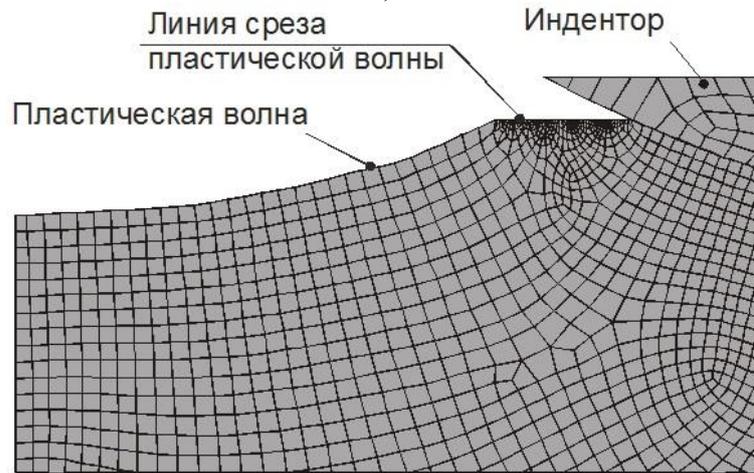
Результаты моделирования позволили определить напряженно-деформированное состояние, характеризуемое тензорами напряжений и относительных деформаций в узлах конечно-элементной модели и вдоль линий тока.

Наибольший перепад всех компонент напряжений наблюдается в зоне при вершине деформирующего ролика. Здесь высокие значения сжимающих напряжений в районе передней контактной поверхности переходят в около нулевые или растягивающие (рис. 1.19, в) напряжения в районе задней контактной поверхности ролика.

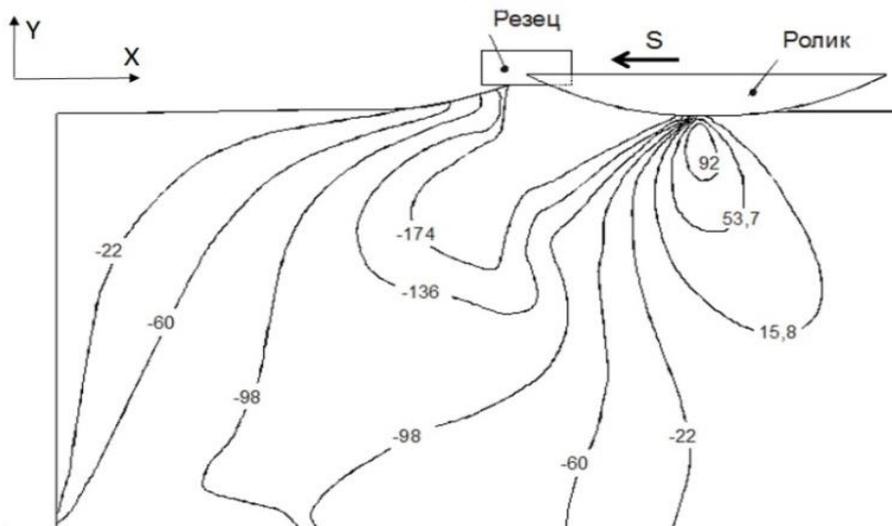
Величина градиента достигает -2200 МПа на 1 мм длины очага деформации [183](см. табл. 1.2). Таким образом, можно сказать, что процесс PCO позволяет интенсифицировать НДС в очаге деформации.



а)



б)



б)

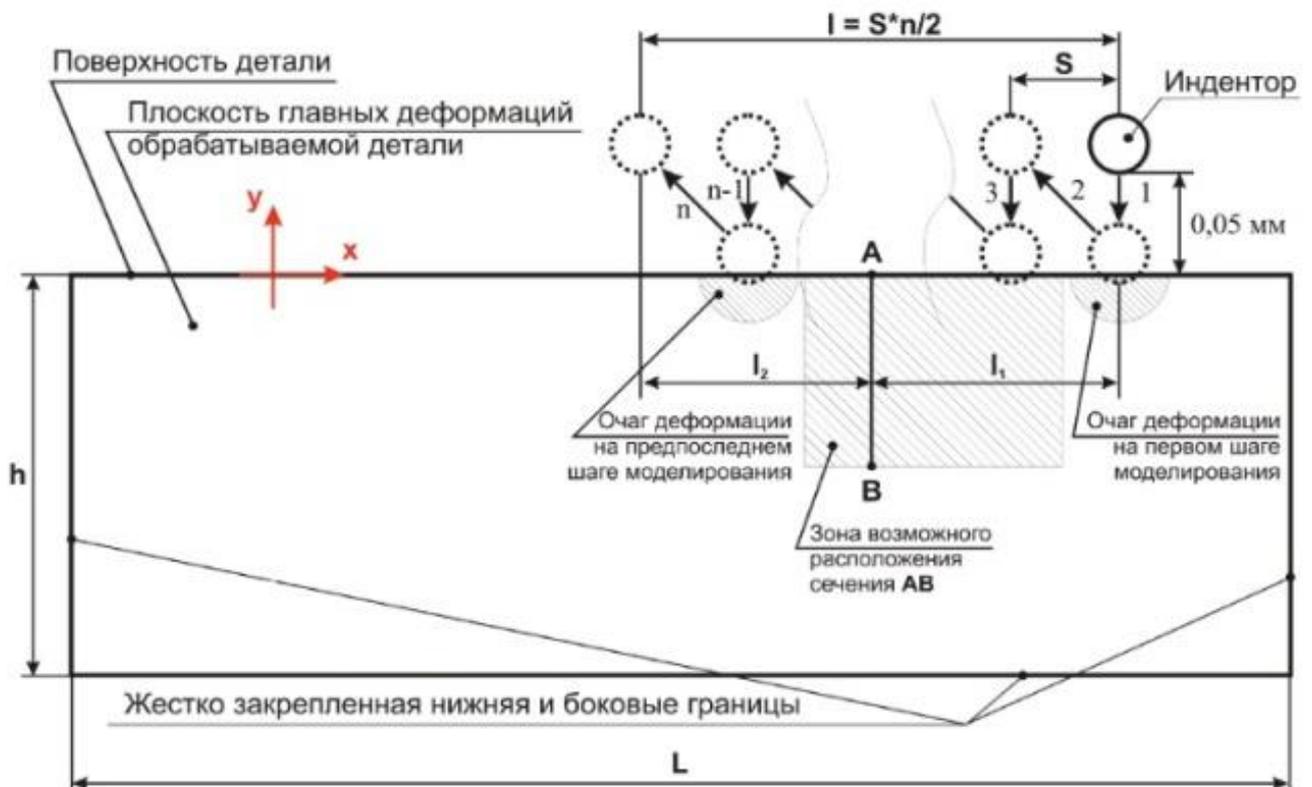
Рисунок 1.19 Модель процесса размерного совмещенного обкатывания (PCO) [183]: а) модель процесса PCO; б) зона среза пластической волны (фрагмент КЭ-модели) в) распределение компонент напряженного состояния, σ_{xy} , МПа

Блюменштейном В. Ю. и Махаловым М. С., с целью интенсификации НДС, разработана модель процесса ППД шариковым инструментом ($R_{пр} = 5$ мм) по схеме многократного нагружения-разгрузки металла детали (рис. 1.20, а), максимально учитывающей феноменологию процесса ППД, и получены распределения параметров напряженно-деформированного состояния, а также параметры механического состояния поверхностного слоя и остаточные напряжения применительно к стали 45 (ГОСТ 1050-88, табл. 1.2) [184].

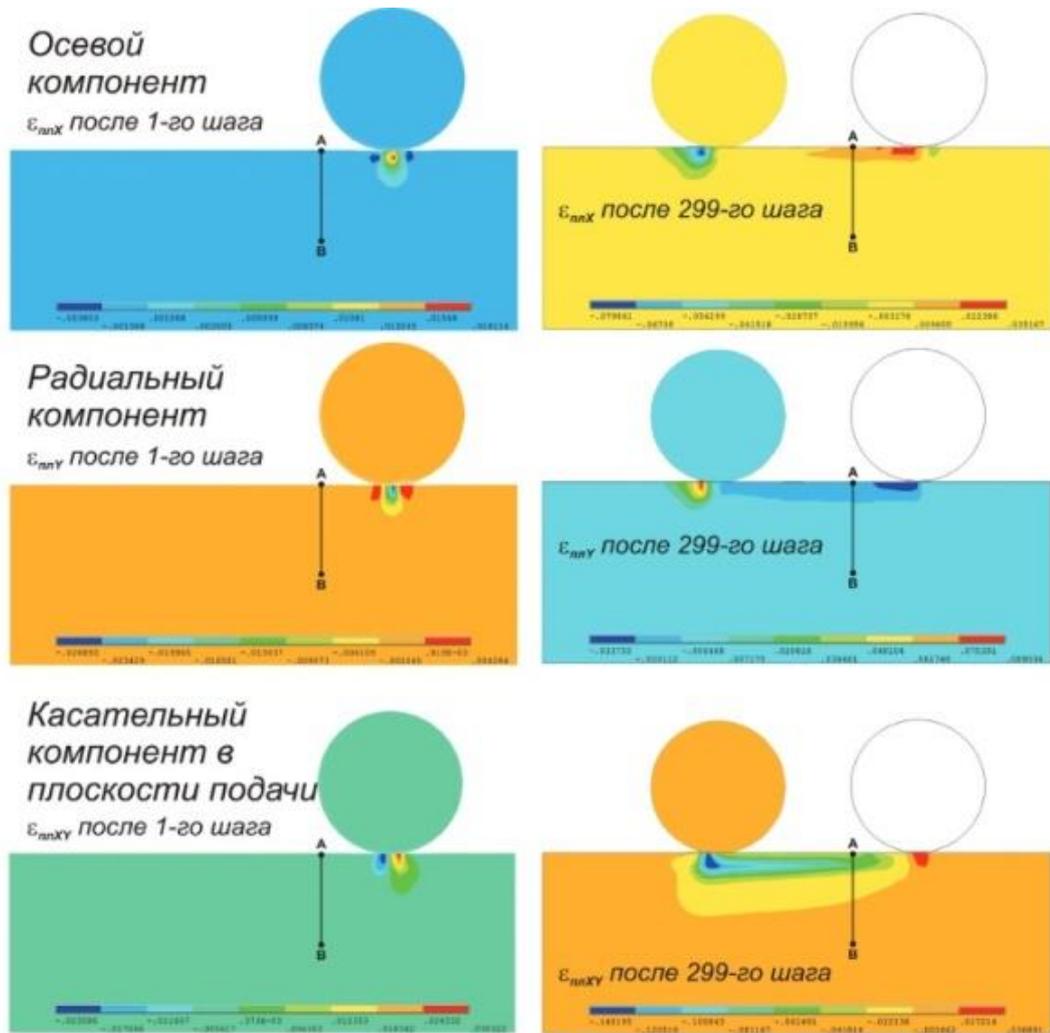
Авторами установлено, что среднее нормальное напряжение (инвариантная величина, математически равная среднему арифметическому нормальных или главных напряжений) изменяется в диапазонах $-1460...30$ МПа и $-430...70$ МПа соответственно на предпоследнем и последнем шагах моделирования.

Представленная картина позволяет сделать вывод о том, что в целом большая часть пространства очага деформации, как и полученный в результате обработки поверхностный слой, находятся преимущественно в состоянии сжатия.

Рядом исследований с использованием КЭ-метода показана возможность интенсификации напряженно-деформированного состояния методом ППД с применением, в том числе, сложнопрофильного инструмента (рис. 1.21) [185-189, табл. 1.2.].



а)



б)

Рисунок 1.20 Модель процесса ППД сферическим индентором, при многократном нагружении ПС[184]: а) постановка задачи при МКЭ-моделировании; б) распределение компонент тензора пластической деформации после первого и 299-го шагов моделирования

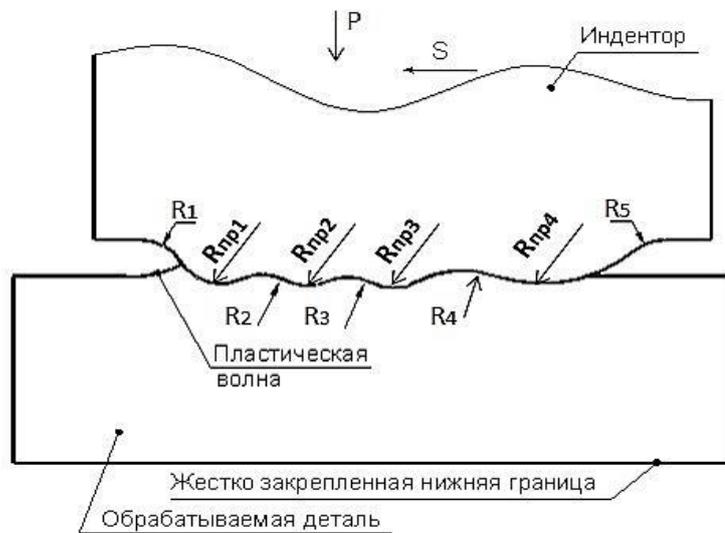


Рисунок 1.21 Схема постановки конечно-элементного моделирования обработки сложнопрофильным инструментом [185-189]

Таблица 1.2 Сопоставление значений компонентов тензора напряжений (σ_x , σ_y , σ_{xy}) в зависимости от технологической схемы интенсификации напряженно-деформированного состояния

Автор, ссылка	Технологическая схема интенсификации НДС	Материал заготовки	Значения компонентов тензора напряжений (σ_x , σ_y , σ_{xy}),			Зона локализации наибольших сжимающих напряжений в очаге деформации	Глубина упрочнения, мм	Твердость, <i>HV</i>
			Осевой, σ_x , МПа	Радиальный, σ_y , МПа	Касательный в плоскости подачи, σ_{xy} , МПа			
Зайдес С. А. [179, 180]	ППД с вращением ролика относительно горизонтальной оси	Сталь 45	-335	-356	-	Под деформирующим индентором (роликом)	2,20	270
	ППД без вращения		-352	-365	-	Под деформирующим индентором (роликом)	2	240
	ППД с вращением ролика относительно вертикальной оси		-364	-397	-	Под деформирующим индентором (роликом)	2,40	280
	ППД с вращением двух роликов относительно вертикальной оси		-746	-744	-	Под деформирующим индентором (роликом)	2,5	300
Махалов М. С., Блюменштейн В. Ю. [183, 184]	Размерно-совмещенное обкатывание (РСО)	Сталь 45	-500	-700	-250	Зона передней контактной поверхности и в районе вершины торового ролика	от 0,9 до 10 мм	340
	ППД шариком $R_{пр} = 5$ мм		-684	-172	-183	Под шариковым индентором	-	-
Блюмен-	ППД МР-	Сталь	-904	-865	-828	В свобод-	4,10	445

штейн В. Ю., Митрофанова К.С. [185-190]	роликом (тип 1)	45				ных полостях сложного профиля инструмента		
	ППД МР-роликом (тип 2)		-760	-620	-597	Под деформирующими инденторами сложно-профильного инструмента	3,01	360
<i>Liou J. J.</i> [182]	ППД цилиндрическим роликом, (диаметром 4 мм, шириной 2,5 мм, скругление по краям 0,5 мм)	Титановый сплав Ti-6Al-4V	-235	-416	-500	Под деформирующим индентором (цилиндрическим роликом)	1,1	250

Таким образом, представленные выше феноменологические, математические, кинетические и конечно-элементные модели, позволяют дать достаточно полное представление о теории процесса ППД.

По мнению автора, наиболее важной и информативной является феноменологическая модель Смелянского В. М. механической теории процесса ППД, которая адекватно описывает процесс возникновения очага деформации в поверхностном слое детали, а также физико-механические явления связанные с ним.

Кроме того данная модель раскрывает закономерности формирования ПС с позиции механики пластически деформируемых сред, учитывая такие процессы и параметры, как: перемещение условной частицы металла вдоль линии тока и ее состояние, описываемое тензорами деформаций $\Delta \varepsilon(x, y)$ и пластическими напряжениями $\sigma(x, y)$; накопленную деформацию сдвига Γ ; степень исчерпания запаса пластичности Ψ ; остаточное напряжение $\sigma_{\text{ост}}$.

Данная модель получила свое развитие в направлении учета технологического наследования (Блюменштейн В. Ю.), а также легла в основу создания других моделей,

позволяющих интенсифицировать процессы ППД. К таковым можно отнести: комбинированные методы, совмещенные методы, а также методы с усложненной формой рабочего профиля деформирующих инструментов.

Анализируя представленные выше результаты конечно-элементного моделирования при интенсификации напряженно-деформированного состояния очага деформации, можно утверждать, что ППД в значительной степени влияет на значения среднего нормального напряжения. Данное обстоятельство позволяет вести поиск как конструкции деформирующего инструмента, так и схемы нагружения, обеспечивающие возможность создания больших значений сжимающих напряжений в очаге деформации.

Анализируя значения компонентов тензора напряжений (таблица 1.2), можно сказать, что наибольшие значения сжимающих напряжений (-900 МПа) можно наблюдать при интенсификации НДС с применением сложнопрофильного инструмента. В связи с этим необходимо выполнить анализ механики данного процесса ППД и оценить роль среднего нормального напряжения.

1.3 Анализ механики процесса ППД и роль среднего нормального напряжения

Новизной решения, предложенного Смелянским В.М., явилось то, что НДС в ОД определялось по накопленному значению деформации; при этом последняя является основным показателем, определяющим упрочнение, степень исчерпания запаса пластичности металла и остаточные напряжения.

Как было сказано ранее, в дальнейшем, на основе базовой модели механики процессов ППД Смелянского В.М., данная модель была развита Блюменштейном В.Ю. в направлении учета ТН [83]. Ключевыми научными элементами подхода, разработанного Блюменштейном В.Ю., являются:

- концепция механики ТН, представленная в виде информационной системы, основанной на учете, обобщении, систематизации и структурировании информации о качестве ПС деталей машин и описанной в единых терминах и категориях механики деформируемых сред;
- функциональная модель механики ТН, описывающая основные требования и отображающая функциональную структуру информационной системы, а также производимые этой системой действия и связи между этими действиями;

- модель процесса формирования ПС, представленная системой кинетических уравнений, описывающих ТН, как непрерывный процесс накопления деформаций и исчерпания запаса пластичности металла по стадиям и этапам с учетом сложной немонотонной истории нагружения;
- система математических уравнений формирования и трансформации состояния ПС, описывающих ТН в терминах и категориях программ нагружения на стадиях резания, ППД и эксплуатационного циклического нагружения деталей.

Было показано, что при обкатывании ППД традиционным торцовым роликом усилием $P = 2500$ Н наибольшее количество металла ОД находится в условиях сжатия, при этом, наибольшее значение среднего нормального напряжения (σ) соответствует зоне контакта инструмента с деталью (рис. 1.20).

Известно, что среднее нормальное напряжение (σ) равно одной трети суммы главных напряжений или одной трети первого инварианта тензора напряжений. При этом под гидростатическим напряжением понимают среднее нормальное напряжение взятое со знаком минус.

Показано, что перед деформирующим инструментом, в зоне вершины пластической волны, локализуются наибольшие значения интенсивности касательных напряжений (T). Данная схема нагружения приводит к интенсивному накоплению деформаций в передней зоне ОД. По мере упрочнения металла каждый последующий рабочий ход приводит к более «жестким» схемам нагружения, приводящим к накоплению предельных деформаций и полному исчерпанию запаса пластичности металла.

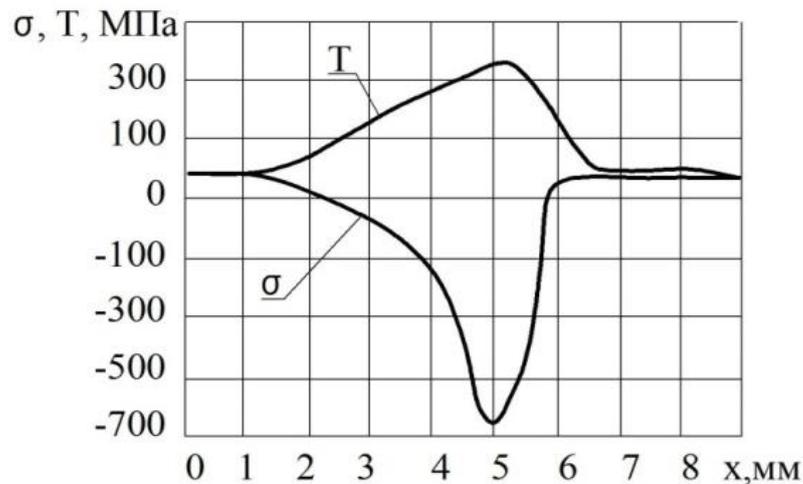


Рисунок 1.20 Распределение среднего нормального напряжения и интенсивности касательных напряжений вдоль контура очага деформации после первого рабочего хода: T – интенсивность касательных напряжений; σ – среднее нормальное напряжение

Исследования, проведенные в последние 30-40 лет, показали, что высокое гидростатическое давление позволяет накапливать в упрочняемом материале большие деформации без его разрушения, повышая пластичность, таким образом, что в некоторых материалах можно наблюдать эффект сверхпластичности под давлением [190-192].

В работах [190-192] в результате выполненных исследований получены адекватные данные о пластичности в области высоких сжимающих напряжений, которые сопровождают процесс обработки металлов давлением.

Так, по данным [190], степень деформации сдвига (пластичность), накопленная металлом к моменту разрушения, в зависимости от показателя схемы напряженного состояния, равного $\Pi = \sigma/T = -1,0$ (где T – интенсивность касательных напряжений), составила: для стали 20 - $\Lambda_p \sim 3,3$; стали 45 - $\Lambda_p \sim 2,6$; стали 12Х18Н10Т - $\Lambda_p \sim 5,6$; стали 30ХГСА - $\Lambda_p \sim 5,1$. При увеличении гидростатического напряжения предельные накопленные деформации существенно возрастают.

В работе [193] при процессах поверхностного пластического деформирования (ППД), в качестве меры поврежденности пластически деформированного металла принята величина использованного ресурса пластичности Ψ . Авторами оцениваются значения Ψ в зависимости от режимов процесса ППД, при этом предполагается, что при $0 < \Psi \leq 0,3$ происходит развитие дислокационной структуры и образование упругих дефектов в виде субмикропор, заживающихся при отжиге. При значениях $0,3 < \Psi \leq 0,6$ возникают и накапливаются энергетически устойчивые дефекты, которые не устраняются отжигом, при $0,6 < \Psi \leq 1,0$ идут процессы объединения микропор и образования микротрещин. Авторы полагают, что для получения качественного поверхностного слоя, необходимо, чтобы величина использованного ресурса пластичности не превышала значений $\Psi \leq 0,3 \dots 0,4$, так как при таких значениях Ψ кинетика процессов накопления и заживления повреждений близка к кинетике рождения и аннигиляции дислокаций. Так же авторы отмечают, что при ППД напряженно-деформированное состояние неравномерно, что обуславливает отличие процесса накопления повреждений в поверхностном слое от аналогичных процессов, происходящих при пластической деформации больших объемов металла.

Также известно, что воздействие гидростатического (всестороннего) давления, приводит к заживанию дефектов металлов (микропор, микротрещин), тем самым замедляя снижение пластичности, и в результате, позволяет улучшить свойства материала.

лов и восстановить их эксплуатационные характеристики [194-195]. При этом под «залечиванием» подразумевается совокупность тонких физических процессов, происходящих на структурном уровне, в результате приводящим к уменьшению количества дефектов металла.

Ранее, в исследовании [196] установлено, что некоторые даже хрупкие металлы в условиях высокого гидростатического давления выше определенного значения становятся пластичными и растягиваются с образованием шейки. Кроме того, установлена зависимость предельной пластичности при растяжении металлов при высоком гидростатическом давлении.

Рассматривая вопрос о залечивании металла на металлографических шлифах, на которых заранее были созданы микропоры и дефекты под действием гидростатического давления, авторы пришли к следующему выводу: под воздействием высокого гидростатического давления можно наблюдать, как подавление развития трещин разрушения, так и подавление её зарождения. При этом, в точках контакта под воздействием высоких контактных напряжений и взаимного проскальзывания происходит залечивание металла, аналогичное по механизму холодной сварке.

Таким образом, обеспечение высоких значений среднего нормального напряжения является одним из необходимых условий, как для залечивания дефектов металла, так и для измельчения структуры обрабатываемого материала. При этом традиционные методы ППД не способны обеспечить высокое среднее нормальное напряжение в очаге деформации. Это связано с ограничениями, к которым можно отнести: исходные свойства металла детали; допустимый диапазон изменения технологических параметров режима обработки, к которым относится и форма профиля обкатного ролика. По мнению автора, обеспечить высокие значения среднего нормального напряжения возможно за счет разработки и внедрения новых способов, устройств и деформирующих инструментов, способных интенсифицировать НДС в очаге деформации, без разрушения поверхностного слоя обрабатываемой детали.

1.4 Анализ способов, устройств и деформирующих инструментов для обеспечения высокого гидростатического давления в очаге деформации в процессах ППД

Методы, способы и устройства, позволяющие обеспечить высокие значения среднего нормального напряжения, приведены на рисунке 1.21.

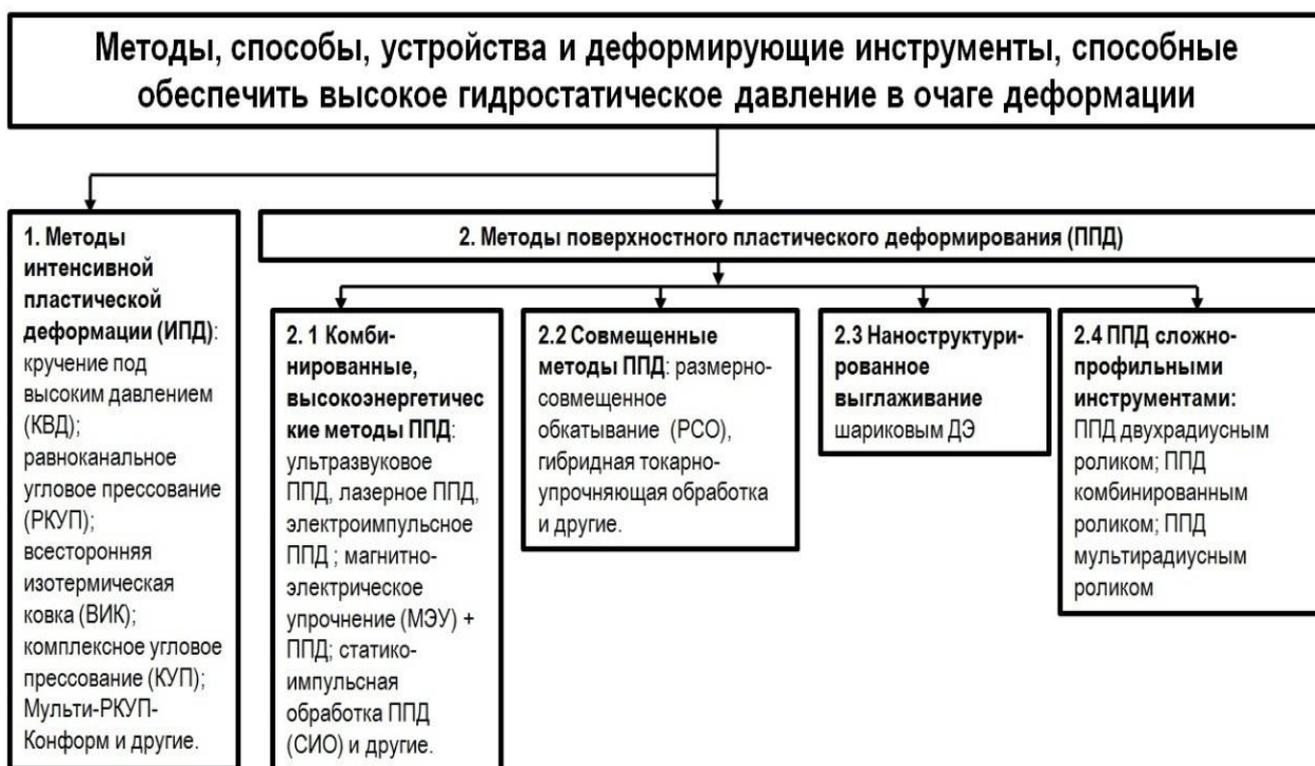


Рисунок 1.21 Методы, способы и устройства, обеспечивающие высокое гидростатическое давление

Известно, что в максимально возможной мере использовать высокое среднее нормальное напряжение со знаком минус (гидростатическое давление) удастся в процессах: кручения под высоким давлением (КВД) [197-200], равноканального углового прессования (РКУП) [201-205], всесторонней изотермической ковки (ВИК) [206-208], комплексного углового прессования (КУП) [209], комбинированного воздействия интенсивной пластической деформацией и термической обработки, кручения с наложением высокого гидростатического давления и другие.

Как было отмечено выше, к числу методов, позволяющих обеспечить высокое значение среднего нормального напряжения, можно отнести комбинированные, высокоэнергетические методы ППД, такие как: ультразвуковое ППД, лазерное ППД, электроимпульсное ППД и другие [210-212]. Получаемые эффекты от данных способов обработки, в основном, делятся на поверхностные и объемные [213].

Объемный эффект заключается в том, что волна пластической деформации распространяется в материале под действием деформирующего инструмента и высокоэнергетического источника, например, ультразвуковой вибрации.

Исследователями установлено положительное внимание УЗК ППД при обработке: различных марок стали [214–215], титановых сплавов [216-217], алюминиевых спла-

вов [218-219] и сплавов магния [220–221]. Учеными проведено большое количество экспериментальных исследований и установлено, что обработка УЗК ППД позволяет обеспечить повышение усталостной прочности [222], улучшает износостойкость [223], значительное увеличение твердости [224], увеличение предела текучести [225], повышение коррозионной стойкости [226], уменьшение шероховатости поверхности и измельчение зерна [227].

Так, *Liu D.* и др. [228], применяя ультразвуковой метод ППД на нержавеющей стали, получили градиентный упрочненный слой глубиной до 650 мкм с характерными зонами: термомеханический связанный слой с удлиненными зёрнами; ультрамелкозернистый слой; мелкозернистый слой; слой матрицы с низкой деформацией. С увеличением глубины размер зерна постепенно увеличивался, тогда как плотность дислокаций менялась от высокой к низкой, а затем к высокой.

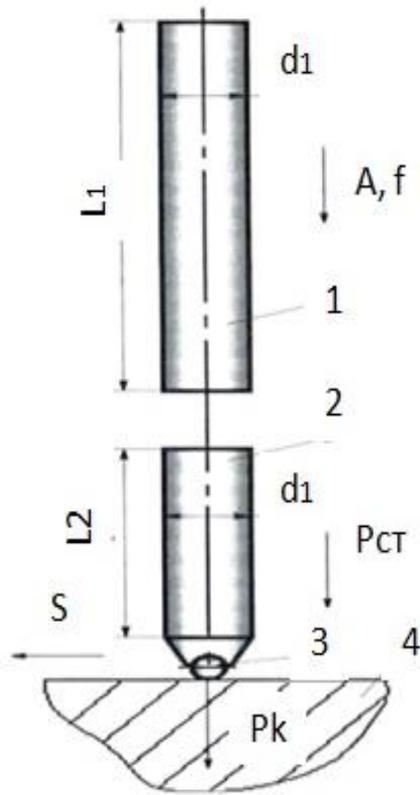
Применяя высокоэнергетические методы ППД можно активировать движение атомов, дислокаций, границ зёрен и другие параметры микроструктуры обрабатываемой детали, тем самым в результате улучшая качество ПС обрабатываемой детали. Кроме того, данные методы способны улучшить состояние контакта между деформирующим инструментом и деталью.

Киричком А. В., Соловьевым Д. Л. с коллективом соавторов [235-237, 282], разработаны способы и процессы статико-импульсной обработки (СИО). Разработан способ градиентного упрочнения, использующий для пластического деформирования ударные волны, создающие высокое давление в очаге деформации и формирующие большую глубину упрочненного поверхностного слоя. Упрочненный поверхностный слой формируется в результате многократных импульсных воздействий, образованных ударными волнами в ударной системе боек–волновод (рис. 1.22).

Способ деформационного упрочнения ударными волнами позволяет регулировать равномерность распределения более мелких и крупных измельченных частиц. В результате такой обработки создается гетерогенная ультрамелкозернистая градиентно-упрочненная структура, чередующая твердые и пластичные участки по заданному закону, которая более эффективно повышает эксплуатационные свойства материала.

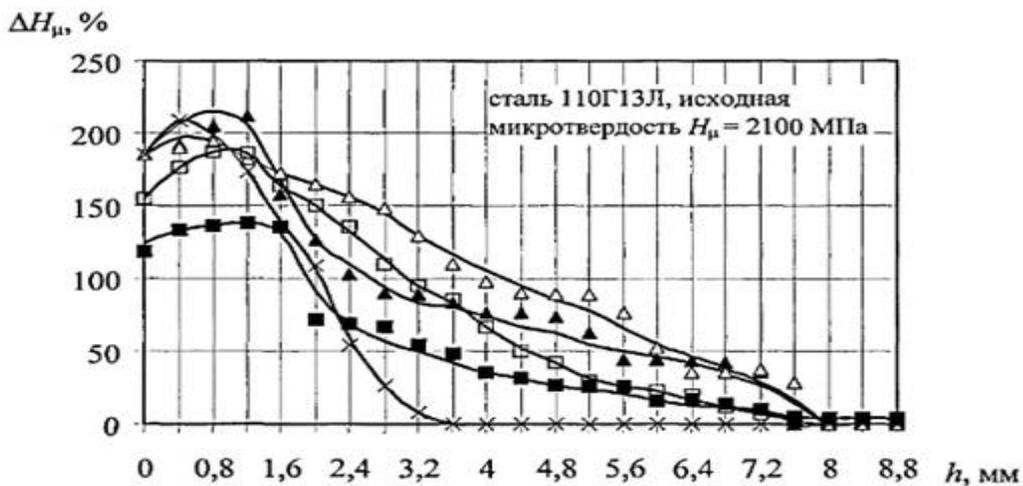
Установлено наличие измельченных частиц размером до 100...300 нм; высокая концентрация наночастиц обнаружена в поверхностном слое на глубине 3...8 мм. Уста-

новлено чередование измельченных частиц определенных размеров вдоль упрочненного поверхностного слоя.



а)

б)



▲ – шар, диаметром 14,5 мм;

□ – ролик, $D_p=10$ мм, $b_p=15$ мм;

△ – шар, диаметром 22 мм;

■ – ролик, $D_p=20$ мм, $b_p=15$ мм;× – клин, $R=1,5$ мм, $b_p=40$ мм;

в)

Рисунок 1.22 Статико-импульсная обработка ППД, по данным Киричека А. В., Соловьева Д. Л. [235-237]: а) схема нагружения: 1 – боек; 2 – волновод; 3 – инструмент; 4 – упрочняемая поверхность; б) фото инструмента и оснастка для упрочнения отверстий статико-импульсной обработкой; в) глубина h и степень упрочнения ΔH_{μ} при СИО в зависимости от формы инструмента

Краткие результаты влияния комбинированных способов обработки ППД на качество поверхностного слоя и свойства обрабатываемых материалов, других исследователей [229-234], приведены в таблице 1.3.

Таблица 1.3 Влияние комбинированных способов ППД на качество поверхностного слоя обрабатываемого материала

Способ комбинированной обработки ППД	Обрабатываемый материал	Усилие обкатывания (Н); частота (кГц) и амплитуда (мкм) колебаний; диаметр (Ø) ДЭ (мм)	Результат
Лазерное ППД, по данным <i>Liu J. et al.</i> [229]	Титановый сплав (Ti64)	50 Н; 20 кГц, 24 мкм; Ø 2, 38 мм	Повышение микротвердости до 550 HV по сравнению с исходным состоянием (310 HV); незначительный рост зерна за счет локального нагрева, вызванного лазерным пучком
Электроимпульсное, ультразвуковое ППД, по данным <i>Xie J. et al.</i> [230]	Высокоэнтропийный сплав (CrMnFeCoNi high entropy alloy)	800 Н; 30 кГц, 6 мкм; Ø 14 мм	Сформирована градиентная, нанокристаллическая структура материала; увеличение пластичности и прочности на растяжение (на 3%); увеличение относительного удлинения на 21,9%.
Ультразвуковое поверхностное обкатывание с электроимпульсной обработкой, по данным <i>Sun Z. et al.</i> [231]	Жаропрочный, высококачественный сплав (Alloy 718 (Inonel718))	1090 Н; 300, 400, 500 Гц, 6 мкм; Ø 12 мм	Увеличение микротвердости с 250 HV до 475 HV. Улучшение износостойкости поверхности
УЗК ППД, по данным <i>Amanov A. et al.</i> [232]	Нержавеющая сталь 304 разработки <i>American Iron and Steel Institute (AISI 304)</i>	40 Н; 20 кГц, 30 мкм; Ø2,38 мм	Микротвердость увеличивается на 50% (исходная 36 HRC); шероховатость поверхности уменьшается на 30% (исх. Ra 14 мкм); остаточные напряжения увеличиваются с -70 МПа до -1703 МПа
Магнитно-электрическое упрочнение (МЭУ) и поверхностного пластического деформирования (ППД), совмещенных в одной технологической схеме, и после-	Образцы из стали 45 с покрытиями из ферромагнитных порошков (ФМП) Fe-5%V (ГОСТ 9849-86) и ФБХ-6-2 (ГОСТ 11546-75)	Обработка поверхностей проводилась: МЭУ - на установке модели УМЭУ-1; ППД – накатным устройством с	ППД и последующая лазерная термообработка нанесенных покрытий МЭУ позволяет уменьшить среднюю их толщину до 5 %, снизить их объемную пористость в 1,5–1,7 раза, среднюю шероховатость по параметру Ra до 18 % и среднюю разнотолщинность до 1,2 раза.

дующая лазерная термообработка, по данным Рудяка Н. С. с соавторами [233]		роликовым электродом-инструментом; лазерная – CO_2 -лазером модели «Комета-2» мощностью 1 кВт	
УЗК ППД, по данным Рахимянова Х. М., Семеновой Ю. С. [234]	Незакаленная сталь 45	Статическое усилие 15 кг; амплитуда колебаний 25 мкм, n 370...1460 об/мин	Выявлены закономерности формирования характерного для ультразвуковой обработки пластичных материалов рельефа поверхности. Представлена математическая модель для определения геометрических параметров рельефа в зависимости от режимов обработки. Приведено экспериментальное подтверждение ее адекватности

Важно отметить, что в приведенных выше исследованиях [229-232] высокоэнергетических, комбинированных методов ППД получаемая микроструктура в образцах неравновесна. Электронно-микроскопические исследования структуры образцов, обработанных комбинированными методами [232], в основном показывают диффузный дифракционный контраст границ зерен, что в свою очередь свидетельствует о наличии высоких значений среднего нормального напряжения.

Источниками этого являются неравновесные границы зерен, сформировавшиеся в процессе интенсивной деформации металла в результате воздействия ультразвука, лазера или другого источника на очаг пластической деформации.

Кроме достоинств, комбинированные, высокоэнергетические методы ППД обладают такими недостатками, как:

- возможностью получения большего по глубине наклёпанного слоя, но при этом обладающего невысокой микротвёрдостью;
- наличием микрогеометрии поверхности с впадинами, являющимися источниками зарождения микротрещин и напряжений.
- возможностью возникновения растягивающих остаточных напряжений, и незначительными по величине сжимающими напряжениями, что в результате не способствует повышению усталостной долговечности обработанной таким способом детали.

Кроме того, существующие конструкции инструментов для ультразвукового ППД разработаны преимущественно в 80-х годах 20 века, в связи с этим, их основная рабочая часть состоит из магнитострикционных преобразователей.

Как известно, магнитострикционным преобразователям свойственен рост потери энергии на вихревые токи и перемагничивание с ростом частоты, что, в свою очередь, не соответствует ряду таких современных требований, как: надежность, энергосбережение, долговечность, простота в техническом обслуживании. В связи вышесказанным целесообразен поиск альтернативных методов финишных отделочно-упрочняющих технологий, лишенных приведенных недостатков.

Как было отмечено выше, к числу методов позволяющих обеспечить высокое значение среднего нормального напряжения можно отнести совмещенные методы ППД.

Ранее было упомянуто о способе размерно-совмещенного обкатывания (PCO)[183-184], который способен значительно интенсифицировать НДС в обрабатываемой детали и обеспечить высокое среднее нормальное напряжение (от – 650 до – 900 МПа).

По мнению автора, такие результаты возможны в виду того, что в целом очаг деформации при обработке PCO характеризуется теми же геометрическими параметрами, что и при обработке традиционными методами ППД, в тоже время исключение составляет область в районе срезания пластической волны. Именно в этой области, по мнению автора, локализуются наибольшие сжимающие напряжения.

Известно, что на практике такие виды механической обработки, как токарная и фрезерная, выполняются отдельно от чистовой отделочно-упрочняющей обработки ППД, которая выполняется с целью повышение качества поверхностного слоя. Это приводит к увеличению общего времени обработки из-за времени потраченного для настройки каждой технологической операции.

Для повышения производительности были разработаны различные совмещенные, гибридные методы обработки, которые в зарубежных публикациях именуется как «гибридные токарно-упрочняющие процессы» (*hybrid turning-burnishing process*) [238].

Краткие результаты влияние гибридных и совмещенных способов обработки ППД на качество поверхностного слоя и свойства обрабатываемых материалов других исследователей [183-184, 239-241] приведены в таблице 1.4.

Таблица 1.4 Влияние совмещенных способов ППД на качество поверхностного слоя обрабатываемого материала

Способ совмещенной, гибридной обработки ППД	Обрабатываемый материал	Режим обработки	Результат
PCO, Блюменштейн В. Ю., Махалов М. С. [183]	Сталь 45. Дополнительно использовались также стали 20, 40Х, 18ХГТ, 12Х18Н10 Т	$S = 0,1$ мм/об; $n = 100$ об/мин; $R_{пр} = 3$ мм	Возможность создавать натяги деформирующих инструментов от 0,1 до 1,0 мм без разрушения металла поверхностного слоя за счет срезания пластической волны; обеспечивает точность обработки до IT 8-9 при точности исходной (необработанной) заготовки IT 14; шероховатость поверхности не более Ra 0,4; глубину упрочнения до 10 мм; Повышение усталостной прочности до 2,5-3 раз. Повышение микротвердости до 340 HV по сравнению с исходным состоянием (160...180 HV); σ от -650 до -900 МПа.
Гибридная токарно-упрочняющая обработка <i>Rami A.</i> с соавторами [239]	Легированная хромо-молибденовая сталь (<i>AISI 4140 steel</i>)	$S = 0,05$ мм/об; $n = 800$ об/мин; $R_{пр} = 2,5$ мм	Снижение шероховатости до Ra 0,189 (при исходной Ra 0,9), увеличение твердости (до 300 HV) и остаточных напряжений (до -441 МПа).
Гибридная токарно-упрочняющая обработка <i>Axinte D. A., Gindy N.</i> в работе [240]	Жаропрочный сплав на основе никеля (<i>Inconel 718</i>)	$S = 0,07$ мм/об; $n = 1000$ об/мин; $R_{пр} = 5$ мм	Повышает микротвердости до 610 HV (при исходной 200 HV), снижение шероховатости на 68 % (при исходной Ra 3,1 мкм) и увеличение глубины упрочнения (до 300 мкм). Результаты исследования микроструктуры показали наличие деформации зерен в направлении обработки способом PCO на глубину примерно 200 мкм от свободного края поверхности.
Гибридная токарно-упрочняющая обработка <i>Mezlini S.</i> с соавторами [241]	Сталь 45	$S = 0,15$ мм/об; $n = 1500$ об/мин; $R_{пр} = 8$ мм	Снижение шероховатости Ra с 2 мкм до Ra 0,46 мкм; увеличение остаточных напряжений (до -600 МПа) на глубине 20 мкм от свободного края поверхности образца.

Таким образом, анализируя вышеприведенные исследования [183-184, 239-241], можно сказать, что совмещенные способы обработки обладают рядом достоинств, к которым можно отнести: лучшую обрабатываемость материала заготовки; более длительный срок службы инструмента; снижение усилия резания; лучшее качество поверхности; повышение эффективности обработки; возможность одновременной наладки, контроля связи двух инструментов (резца и сферического деформирующего элемента или ролика), которыми можно управлять одновременно. В свою очередь, одновременное воздействие двух инструментов (резца и шарика) в зоне обработки, в том числе в очаге

деформации, активизирует значительные изменения на микроструктурном уровне, а также способствует образованию высокого гидростатического давления.

Как было отмечено выше, к числу методов, позволяющих обеспечить высокое значение среднего нормального напряжения, можно отнести наноструктурированное выглаживание. Наличие гидростатического давления является одним из условий измельчения структуры металла.

В отечественных исследованиях профессор Маркус Л. И. один из первых обнаружил эффект наноструктурирования материала в процессе исследования влияния алмазного выглаживания на качество поверхностного слоя и эксплуатационные свойства дорожек качения подшипников, изготовленных из стали ШХ-15 [242]. Практическая реализация исследования привела к созданию прогрессивной технологии финишной обработки деталей подшипников, обладающих высокими показателями надежности. Глубина залегания сжимающих напряжений находится в пределах от 0,15 до 0,4 мм, а величина варьируется в пределах от 500 до 1100 Н/мм². Оптимальные режимы алмазного выглаживания (P от 50 до 200 Н; V от 3 до 10 м/мин) при упрочнении колец из стали ШХ-15 могут быть назначены с учетом тонкого кристаллического строения металла.

Jafari Tad A. с соавторами [243] полагают, что процесс ППД является эффективным методом подготовки поверхностей аустенитных нержавеющей сталей (*AISI 316L*) для последующего азотирования. В приведенном исследовании после обкатывания шариком, методами рентгеноструктурного анализа (РСА), оптической и (ОМ) сканирующе-электронной микроскопии (СЭМ), авторами установлено увеличение плотности кристаллической решетки, величины сжимающих напряжений (до 850 МПа), твердости до 610 *HV* (при исходной 200 *HV*).

Кроме того, наличие значительных сжимающих напряжений привело к измельчению структуры металла в 1,5 раза (при исходном среднем размере зерна: 25 ± 5 мкм) на глубине 12-20 мкм. Полученные данные коррелируют с результатами *Altenberger I.* [244-245].

Abdolreza J. T. оценил влияние накатывания вольфрамовым шариком ($\varnothing 20$ мм) на микроструктуру поверхностного слоя нержавеющей стали *AISI316L* [246]. Методом рентгенографического анализа и просвечивающей электронной микроскопии установлено наличие ультрадисперсных и наноразмерных равноосных зерен со средним размером 200 Нм и 70 Нм и случайными ориентациями, а также сжимающих напряжений (до

650 МПа) на глубине до 0,35 мкм. Кроме того, наблюдались структурные изменения в виде увеличения микротвердости с 200 *HV* до 450 *HV* и деформационного мартенситного превращения. Данные эффекты возрастали с увеличением числа ходов инструмента.

Nagarajan B. с соавторами [247] исследовано влияние ППД шариками (\varnothing 6,3 мм и \varnothing 12,6 мм) на два жаропрочных сплавах на основе никеля *IN100* и *RR1000*. При исследовании микроструктуры после обкатывания применен метод качественного и количественного анализа – метод дифракции отраженных электронов (*Electron Backscatter Diffraction, EBSD*). Степень упрочнения зерна образцов из сплава *RR1000* характеризовалась с использованием полной ширины при половинном максимуме (*Full width at half maximum, FWHM*) рентгеновских дифракционных пиков и профилей распределения ориентации зерна (*Grain orientation spread, GOS*), полученных методом *EBSD*. В сплаве *IN100* авторами установлено измельчение зерна. Зерна спрессованы в слой толщиной 50 мкм, в котором также установлено наличие сжимающих напряжений, варьирующихся в пределах от -450 до -800 МПа. Также наблюдалось увеличение границ зерен с низким углом и кластеризация плотности дислокаций вокруг карбидов, представляющей собой движение и умножение плотности дислокаций в процессе упрочнения. Анализ *EBSD* показал наличие сильно деформированных зерен на глубине 40-80 мкм с использованием профилей *GOS*.

Большой диаметр шара, по мнению авторов, создает большую пластическую деформацию с сильно деформированными слоями и измельчением зерна на поверхности, что приводит к более высокому и глубокому проникновению сжимающих напряжений и упрочнению, но с уменьшенными поверхностными напряжениями. Полученные результаты коррелируют с данными в работе *Nalla R. K.* с соавторами [248]. *Kumar D.* с соавторами [249] методами тонких физических исследований установили некоторые закономерности, протекающие в ПС при обработке ППД вольфрамовым шариком (\varnothing 6 мм).

Наличие больших значений сжимающих напряжений (от -866 до -1315 МПа) (рис.1.23) авторы связывают с образованием металлического валика впереди инструментами атомной перестановкой частиц металла через механизм «нагромождения» (рис.1.24). Подобный механизм упрочнения рассмотрен в работе *Balland P.* [250].

Как отмечено авторами, увеличение полной ширины половин максимумов (*FWHM*) связано с увеличением плотности дислокационной сетки и локализацией больших значений пластической деформации. Также авторы отмечают, что с увеличением

усилия обкатывания, увеличивается и уровень пластической деформации на 180%, на глубине 169 -479 мм. При обработке с давлением 50 МПа процент зерен с малоугловыми границами увеличивается до 96 % (глубина 50 мкм). Образование малоугловых границ зерна ($1^\circ < \theta \leq 15^\circ$) затрудняет скольжение между зернами и в результате приводит к упрочнению материала, что подтверждено исследованием Валиева Р. З. [251].

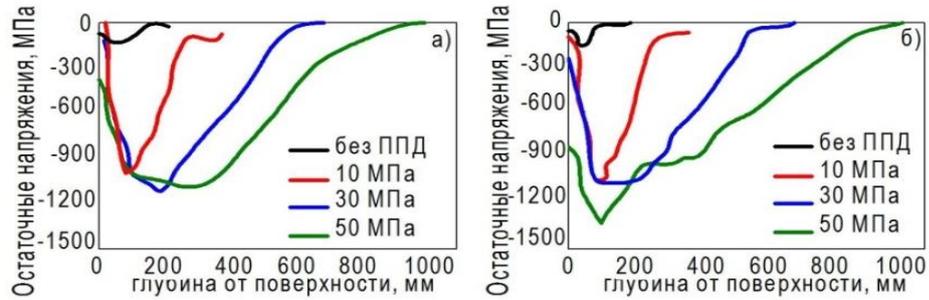


Рисунок 1.23 Распределение остаточных напряжений: (а) в продольном направлении; (б) в поперечном направлении [249]

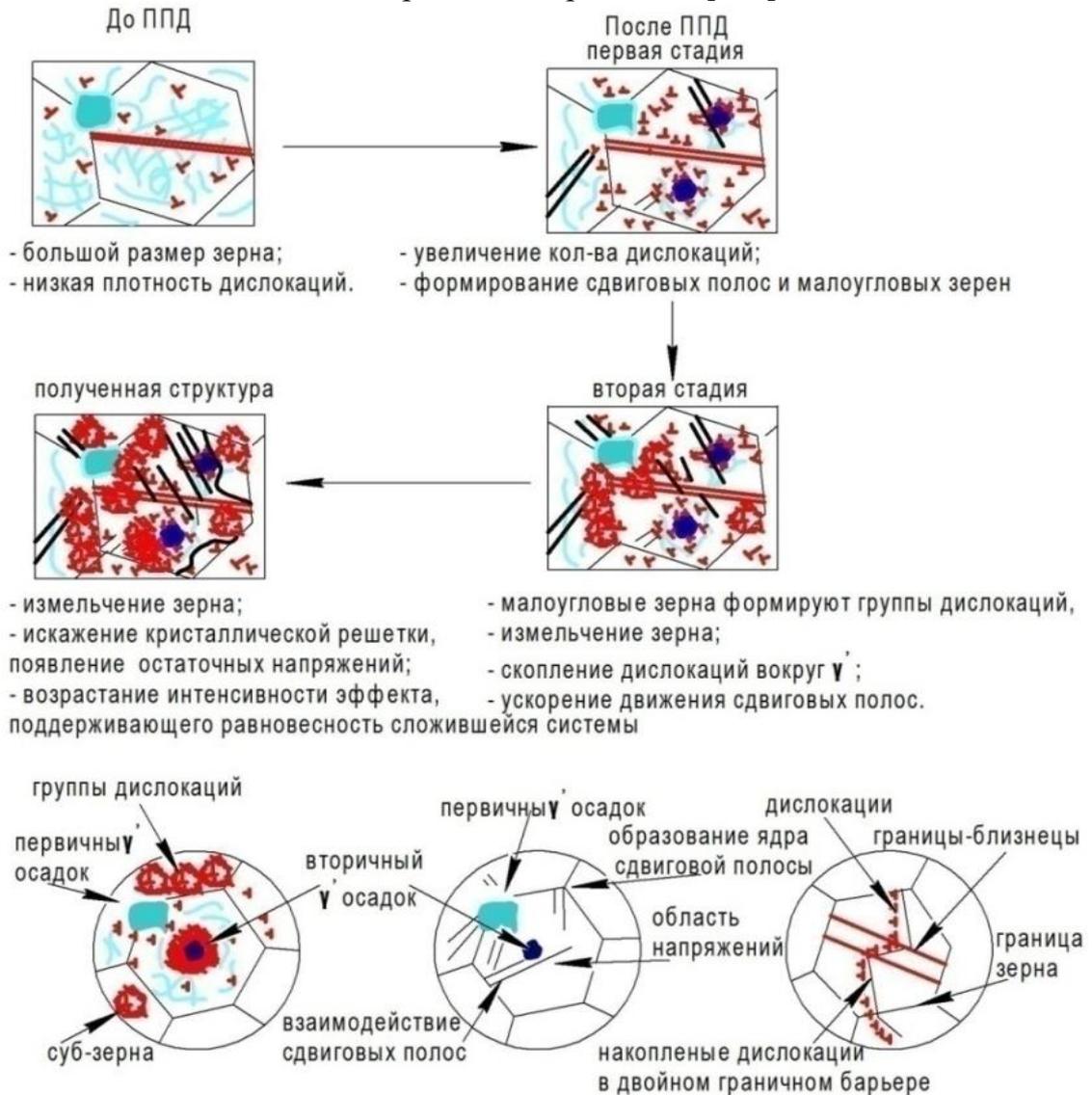


Рисунок 1.24 Схема механизма эволюции структуры и упрочнения после обработки ППД [249]

Классеным Н. В. с соавторами в работах [252-253] установлено, что пластическое деформирование металлов, при определенных условиях позволяет создать дислокационные сверхструктуры с высокой степенью наноразмерной периодичности. Совершенную периодичность дислокационной сетки с малыми расстояниями между дислокациями позволяет предложить новый механизм взаимодействия между ними посредством излучения и поглощения резонансных акустических фонов.

Наличие высокой периодичности дислокационных сверхструктур, подтверждено рядом оптических дифракционных явлений, наблюдаемых в полупроводниковых кристаллах и аналогичных явлений рентгеновской дифракции на атомарных решетках кристалла. К ним относят: повышение коэффициента отражения света от металлов, подвергнутых шариковой обкатке, ослабление поглощения падающей на поверхность обкатного металла света в 1,5 раза, повышение антикоррозионной стойкости и после обкатывания шариком Ø3 мм.

С помощью методики растровой электронной микроскопии установлено наличие градиентной структурой зерен – у поверхности зерна, которые имеют наноструктурные размеры, по мере углубления на 2-3 мкм, размеры увеличиваются до нескольких микрометров. По мнению авторов, появление наноструктуры может быть вызвана двумя причинами: большая неоднородность распределения внутренних напряжений, создаваемых шариком, и быстрая смена их ориентации при движении шарика.

Краткие результаты других исследований, посвященные измельчению структуры методами ППД [254-259], приведены в таблице 1.5.

Таблица 1.5 Влияние способов ППД на измельчение структуры материала

Способ ППД	Обрабатываемый материал	Режим обработки	Результат
Наноструктурированное-выглаживание, Кузнецов В. П. с соавторами. [254-256]	<i>X20Cr13 steel</i>	<i>P 340 Н; S 0,06; 0,04 и 0,02 мм/об</i>	Упроченный слой с УМЗ структурой, глубиной от 3,66 до 6,01 мм. Максимальная интенсивность деформации сдвига 3,75...4 получается при выглаживании со скоростью скольжения индентора 11 м/мин. При более низких скоростях интенсивность деформации сдвига значительно снижается. В то же время увеличение скорости приводит к стабилизации интенсивности сдвиговой деформации на уровне 3,4...3,6.
Интенсивная	Техниче-	Шарик Ø 20 мм; <i>P</i>	УМЗ структура (30-100 нм). Определены

пластическая деформация ИПД, <i>Kolyvanov E. L.</i> [257]	ски чистая (99,95%) поликристаллическая медь с начальным размером зерна около 20 мкм	80 Н; n 200 об/мин	характеристические параметры зернограничной структуры и значения внутренних деформаций методом рентгеновской дифракции в образцах меди, подвергнутых шаровой прокатке. Установлено, что характерная длина когерентности составляет 75–100 нм
Интенсивная пластическая деформация ИПД, <i>Jing Z. et al.</i> [258]	Технически чистая медь (99,97%). Начальный размер зерна образца составлял около 75 мкм.	S 0,12 мм/об; n 560 об/мин; P 2100 Н.	Экспериментальные результаты показали, что градиентный слой имел толщину более 100 мкм. Значительно повышенная твердость вблизи свободного края поверхности, обусловлена преимущественно уменьшением размеров зерен. Зерна наноразмеров (10–20 нм) были ориентированы случайным образом; большинство границ оказались пологими. Именно в наноструктуре преобладала дислокационная активность, сопровождающаяся вращением зерен в локальной, деформированной области.
Криогенное выглаживание роликовым деформирующим инструментом <i>Huang B.</i> с соавторами [259]	Сплав <i>Al 7050-T7451</i>	V 19,2 м/мин, n 101,6 мм/мин; роликовый полировальный инструмент из непокрытого карбида диаметром 14,3 мм; жидкий азот подавался со стороны зазора полировального инструмента и скорость потока составляла приблизительно 10 г/с массы при давлении 1,5 МПа.	На глубине 0,2 мм, наблюдались нанозерны с размером зерна $38,9 \pm 3,3$ нм. Средняя твердость на глубине 200 мкм после криогенного выглаживания выше, чем после сухого выглаживания на 9,5 %, 17,5 % и 24,8 % при скоростях 25, 50 и 100 м/мин соответственно.

На кафедре «Технология машиностроения» Кузбасского государственного технического университета имени Т. Ф. Горбачева (КузГТУ, г. Кемерово), в рамках научного направления «Механика технологического наследования на стадиях жизненного цикла деталей машин», при решении вопроса расширения технологических возможностей метода ППД за счет создания высокого гидростатического давления в ПС металла, на основе механики технологического наследования Блюменштейна В.Ю. и анализе напряженно-деформированного состояния (НДС), разработаны новые конструкции деформирующих инструментов, имеющих специальный рабочий профиль (рис. 1.25)[260-262].

Первый тип профиля (рис. 1.25, а) представляет собой комбинацию 2-х близко-расположенных деформирующих элементов (ДЭ), $R_{пр1}=1\text{мм}$; $R_{пр2}=1\text{мм}$, имеющих относительно друг друга некоторое смещение в радиальном направлении.

Второй тип профиля (рис.1.25, б) представляет собой комбинацию деформирующего элемента профильного радиуса $R_{пр}=3\text{мм}$ и цилиндрической части, расположенной относительно вершины деформирующего элемента с зазором $0,15\text{ мм}$.

Третий тип профиля (рис. 1.25, в) представляет собой комбинацию 4-х последовательно расположенных инденторов: $R_{пр1}=1\text{мм}$; $R_{пр2}=1\text{мм}$; $R_{пр3}=1\text{мм}$; $R_{пр4}=3\text{мм}$, расположенных относительно друг друга с некоторым смещением в радиальном направлении.

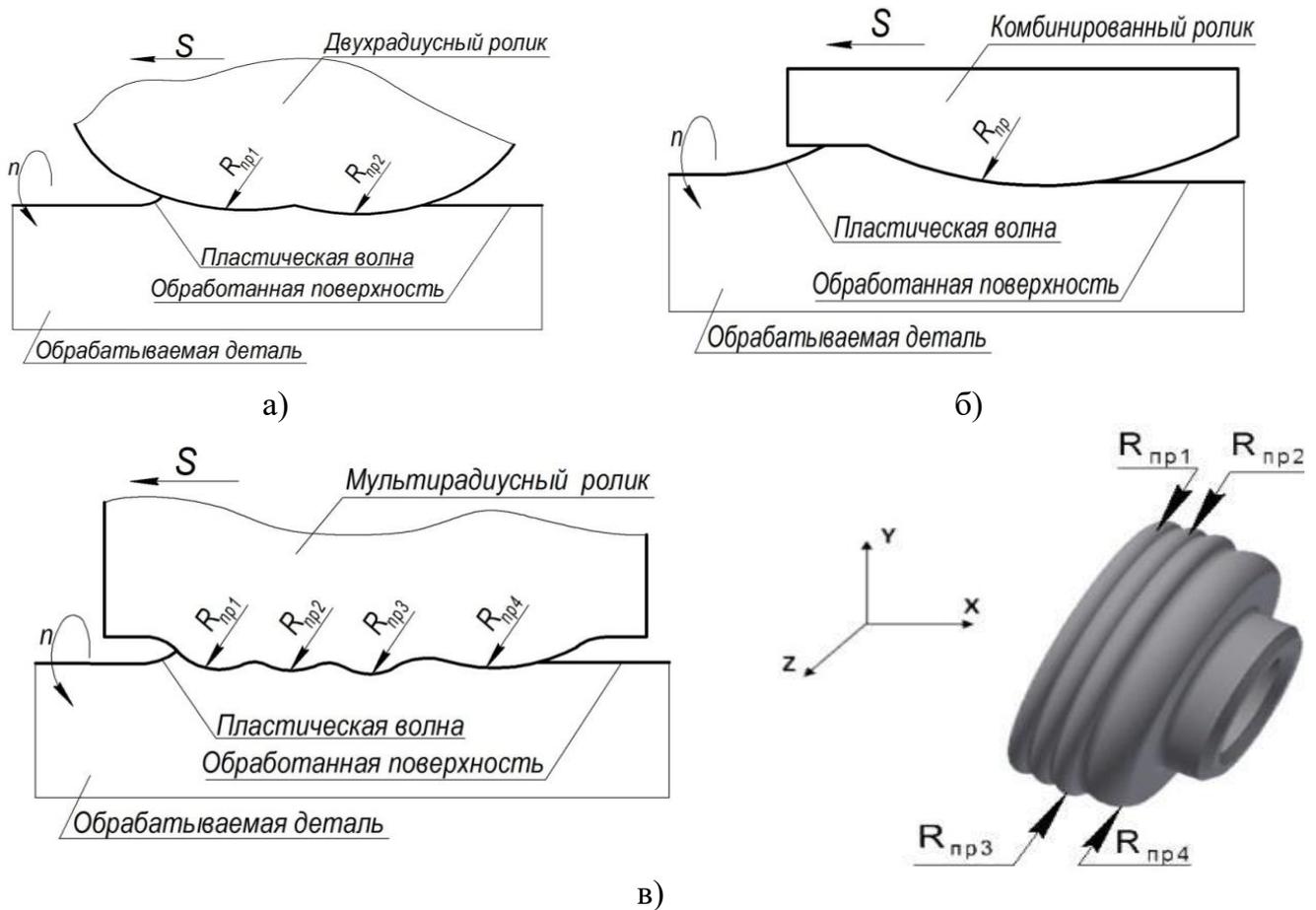


Рисунок 1.25 Схемы ППД с применением: а) двухрадиусного ролика [260]; б) комбинированного ролика [261]; в) мультирадиусного ролика [262]

В рамках данной работы наибольший интерес для автора представляет третий тип ролика – мультирадиусный ролик (МР-ролик).

Такой выбор обусловлен особенностью конструкции и особенностью кинематики внедрения МР-ролика в ПС обрабатываемой детали. По мнению автора, конструкция МР-ролика, имеющая четыре деформирующих элемента с разными натягами, способна

создать в ПС обрабатываемой детали интенсивное напряженно-деформированное состояние с преобладающим высоким гидростатическим давлением без разрушения ПС, что в результате приведет к измельчению структуры обрабатываемого материала.

Данное предположение подтверждено ранее проведенными исследованиями [263-266], результаты которых показывают, что ППД МР-роликом приводит к измельчению структуры, увеличению микротвердости и снижению шероховатости без разрушения поверхностного слоя детали.

Однако, по мнению автора, на данный момент, эффективное применение метода ППД МР-роликом затруднено в связи с отсутствием описания закономерностей формирования состояния поверхностного слоя, позволяющих с учетом механики ТНв единых терминах и категориях оценить влияние режимов обработки на параметры состояния поверхностного слоя обрабатываемой детали.

Опыт развития теории обработки металлов давлением показывает, что использование принципов механики является эффективным средством решения важных практических задач технологии машиностроения, а результаты, полученные при этом, хорошо согласуются с практикой.

Описание закономерностей формирования поверхностного слоя при ППД МР-роликом с учетом механики ТН требует проведения ряда исследований, к таковым относятся: исследование кинематики взаимодействия МР-ролика с ПС детали; установление начальных и граничных условий; решения прямой задачи с учетом механики ТН; установление напряженно-деформированного состояния в очаге деформации и описания формирования и трансформации программ нагружения поверхностного слоя детали; проведение ряда экспериментальных исследований, в том числе, тонких физических.

1.5. Выводы. Цель и задачи исследования

На основании вышеизложенного можно сделать следующие выводы:

1. Анализ научных источников показал, что метод ППД эффективно повышает качество поверхностного слоя детали, позволяет снизить шероховатость, увеличить твердость/микротвердость, глубину и степень упрочнения, способствует формированию благоприятных остаточных напряжений. В совокупности перечисленные параметры качества повышают эксплуатационные свойства деталей машин, включая циклическую долговечность. Показано, что существенно расширилась область применения методов

ППД; помимо валов, осей, штоков и иных деталей-тел вращения методом ППД стали эффективно обрабатывать резьбовые соединения, сложные поверхности лопаток турбин, детали, полученные методом порошковой металлургии, материалы покрытий, биосовместимые сплавы для имплантов, аддитивные материалы, полимеры и другие.

2. Анализ позволил установить, что сложившиеся схемы обработки ППД с применением традиционных деформирующих инструментов (шарика или ролика) исчерпали свои технологические возможности по повышению качества поверхностного слоя деталей машин, в первую очередь, получению большей глубины и степени упрочнения без разрушения материала поверхностного слоя детали. Так, в частности, усилия обкатывания не превышают 2500-4500 Н, что соответствует действительным натягам деформирующих инструментов в пределах 0,05-0,1 мм. Основываясь на библиометрическом анализе достижений в области ППД за последние 30 лет, автор предполагает, что нивелировать данные технологические ограничения и расширить возможности метода можно путем интенсификации процессов поверхностного пластического деформирования, в том числе создавая новые схемы нагружения очага деформации.

3. По мнению автора, актуальным становится расширение технологических возможностей метода ППД, в том числе, в направлении создания новых схем обработки, предполагающих наличие высокого гидростатического давления в очаге деформации поверхностного слоя материала детали без его разрушения. Реализация схем обработки с преобладающим высоким гидростатическим давлением приведет к измельчению структуры, высокому упрочняющему эффекту и частичному восстановлению запаса пластичности металла, что в совокупности повысит долговечность обрабатываемой детали.

4. Выполнен анализ основных моделей и показано, что развитие процессов ППД предполагает анализ сложного напряженно-деформированного состояния очага деформации, оценку физических закономерностей пластического течения, расчет накопленных деформаций и исчерпания запаса пластичности металла в условиях проявления высокого гидростатического давления. Это, в свою очередь, требует создания новых схем и способов обработки на основе комбинирования разных процессов, совмещения в одной наладке различных режущих и деформирующих инденторов, привнесения в зону обработки высокоэнергетических воздействий, изменения кинематики и усложнения траекторий перемещения инструментов и др.

5. Одним из перспективных направлений является реализация схем с высоким гидростатическим давлением в очаге деформации путем применения сложнопрофильного деформирующего инструмента – мультирадиусного ролика (МР-ролик). МР-ролик представляет собой комбинацию 4-х последовательно расположенных инденторов с профильными радиусами, равными $R_{пр1}=1\text{мм}$; $R_{пр2}=1\text{мм}$; $R_{пр3}=1\text{мм}$ и $R_{пр4}=3\text{мм}$, расположенных относительно друг друга с определенным смещением в радиальном направлении. По мнению автора, конструкция МР-ролика, имеющая четыре деформирующих элемента с разными натягами, способна создать в поверхностном слое обрабатываемой детали интенсивное напряженно-деформированное состояние с преобладающим высоким гидростатическим давлением, что в результате приведет к измельчению структуры обрабатываемого материала и повысит упрочняющий эффект без разрушения металла.

6. Раскрытие высокого потенциала процесса обработки МР-роликом требует изучения кинематики процесса, выявления физических закономерностей пластического течения металла, оценки накопления деформаций, исчерпания запаса пластичности, формирования остаточных напряжений и влияния режимов и параметров напряженно-деформированного состояния на качество поверхностного слоя обрабатываемой детали. При этом важным является выявление зон с преобладающим высоким гидростатическим давлением и оценка параметров структурно-фазового состояния металла поверхностного слоя, влияющего на долговечность упрочненных деталей машин.

7. По мнению автора, решение выявленных научных и технологических задач позволит создать теоретические модели процесса обработки МР-роликом и оценить их адекватность реальному процессу. В совокупности полученные закономерности могут быть положены в основу создания цифровых моделей процесса ППД и методик ускоренной автоматизированной технологической подготовки производства.

На основании проведенного анализа была сформулирована следующая **цель работы**: 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 решен следующий комплекс **задач**:

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.

ГЛАВА 2. МЕХАНИКА ПРОЦЕССА ППД МУЛЬТИРАДИУСНЫМ РОЛИКОМ

Согласно главе 1, поверхностное пластическое деформирование мультирадиусным роликом обладает широкими технологическими возможностями по обеспечению интенсивного напряженно-деформируемого состояния в очаге деформации и высокого качества поверхностного слоя обрабатываемой детали.

Такая возможность реализуется с помощью конструктивных изменений МР-ролика, что в результате позволяет эффективно использовать весь потенциал предлагаемого сложнопрофильного инструмента.

В свою очередь, это требует рассмотрения процессов формирования очага деформации, напряженно-деформируемого состояния металла в очаге деформации и поверхностного слоя обрабатываемой детали.

Ранее было принято, что для оценки и управления состоянием ПС применяется разработанный Блюменштейном В.Ю. аппарат механики технологического наследования, ключевыми параметрами которого являются: степень исчерпания запаса пластичности – Ψ , накопленная степень деформации сдвига – Λ и тензор остаточных напряжений – $[T_{\text{ост}}$] (глава 1, подраздел 1.1).

Для решения поставленных задач, приведенных в главе 1, необходимо выполнить исследование формирования очага деформации, разработать структурную, феноменологическую и конечно-элементную модели процесса обработки ППД МР-роликом.

2.1 Структурная модель формирования поверхностного слоя детали при ППД МР-роликом

Разработана структурная модель формирования поверхностного слоя детали на стадии ППД МР-роликом с учетом явления ТН. Структурная модель позволила систематизировать и структурировать большой объем информации, выявить ключевые модули системы и соответствующие связи между ними. В совокупности это позволило сформулировать комплекс исследований по разработке теоретических положений процесса ППД мультирадиусным инструментом.

Для этого была использована методология структурного анализа и проектирования, основанная на использовании *CALS*-технологии, в которой рассматриваемая область знаний представлялась как информационная система. Одна из важных особенно-

стей принятой методологии состоит в постепенной детализации описания возможностей ППД МР-роликом по обеспечению заданных параметров состояния ПС детали.

Структурная модель разрабатывалась в программном продукте *BPwin 4.0 (All Fusion Process Modeler)*, позволяющем проводить описание, анализ и моделирование бизнес-процессов.

Согласно главе 1, в которой ранее был выявлен потенциал сложнопрофильного инструмента – МР-ролика, в качестве основной функции отражающей суть технологического процесса, была выбрана «Интенсифицировать напряженно-деформированное состояние в очаге деформации при ППД МР-роликом».

На контекстной диаграмме (рис. 2.1) показаны основные взаимодействия (обозначены стрелками), которые активируют родительскую функцию.

В качестве входа принято исходное состояние ПС детали С0 после чистовой токарной обработки, которое в свою очередь характеризуется наследуемыми параметрами: микрогеометрией (шероховатостью, волнистостью), микроструктурой, микротвердостью, интегральными механическими параметрами НДС металла (Λ , Ψ , $[T_{\text{гост}}]$).

В качестве управляющего воздействия принят технологический регламент, представляющий собой нормативно-технический документ, разрабатываемый предприятием-изготовителем и описывающий качество и безопасность производимой продукции.



Рисунок 2.1 Контекстная диаграмма уровня А0

Продуктами выполнения функции А0 являются требуемое состояние ПС после ППД С1 и измененная на текущей стадии история нагружения ИН1.

В качестве механизма реализации функции А0 принят режим нагружения, назначаемый технологом.

С целью получения информации о правилах формирования ОД, состояния ПС и реализации механизма обеспечения эксплуатационных свойств ПС детали, осуществляется запрос в базу данных.

Далее из диаграммы А0 путем декомпозиции строились диаграммы-потомки (рис. 2.2), отличительными особенностями которых являются:

- каждый блок диаграммы представляет основную подфункцию исходной функции (блок А0);
- интенсификация напряженно-деформируемого состояния в очаге деформации осуществляется путем одновременного обеспечения трёх основных интегральных параметров, приведенных на рисунке 2.2 и обозначенных как А1, А2 и А3.

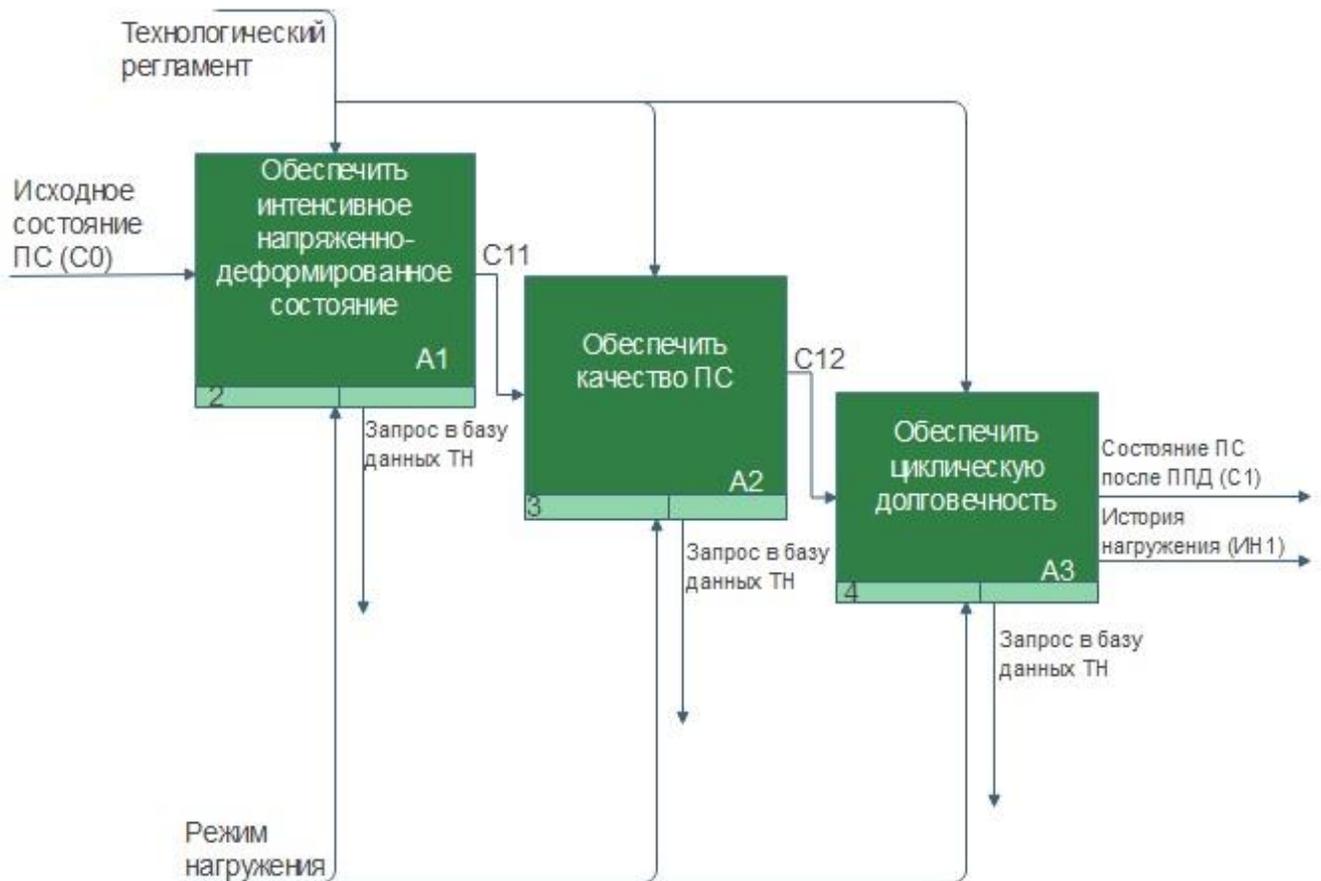


Рисунок 2.2 Декомпозиция диаграммы уровня А0

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 (A11) (рис. 2.3);

— обеспечения высокого уровня сжимающих остаточных напряжений в ПС детали за счет накопления больших деформаций (A12) (рис. 2.3).

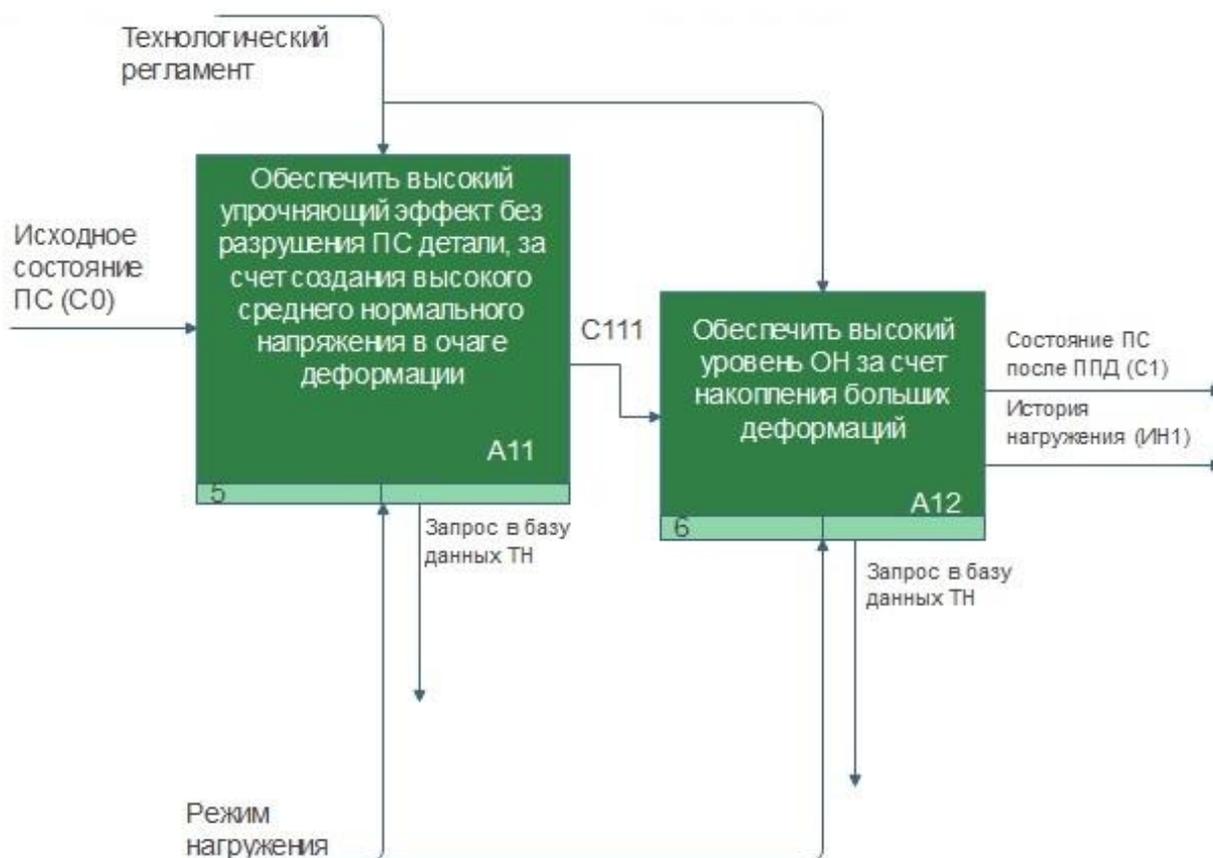


Рисунок 2.3 Декомпозиция диаграммы уровня A1

В свою очередь, обеспечить высокий упрочняющий эффект без разрушения ПС за счет создания высокого среднего нормального напряжения в ОД можно, путем:

— обеспечения необходимых начальных и граничных условий для решения задачи механики (A111) (рис. 2.4);

— обеспечения высокого гидростатического давления (A112) (рис. 2.4);

— обеспечения накопления больших деформаций (A113) (рис. 2.4).

Декомпозиция контекстной диаграммы A11 приведена на рисунке 2.4. С феноменологической точки зрения воздействие МР-ролика на поверхностный слой приводит к возникновению очага деформации, созданию высокого гидростатического давления в очаге деформации, а также к накоплению больших деформаций без разрушения ПС детали (рис. 2.4).

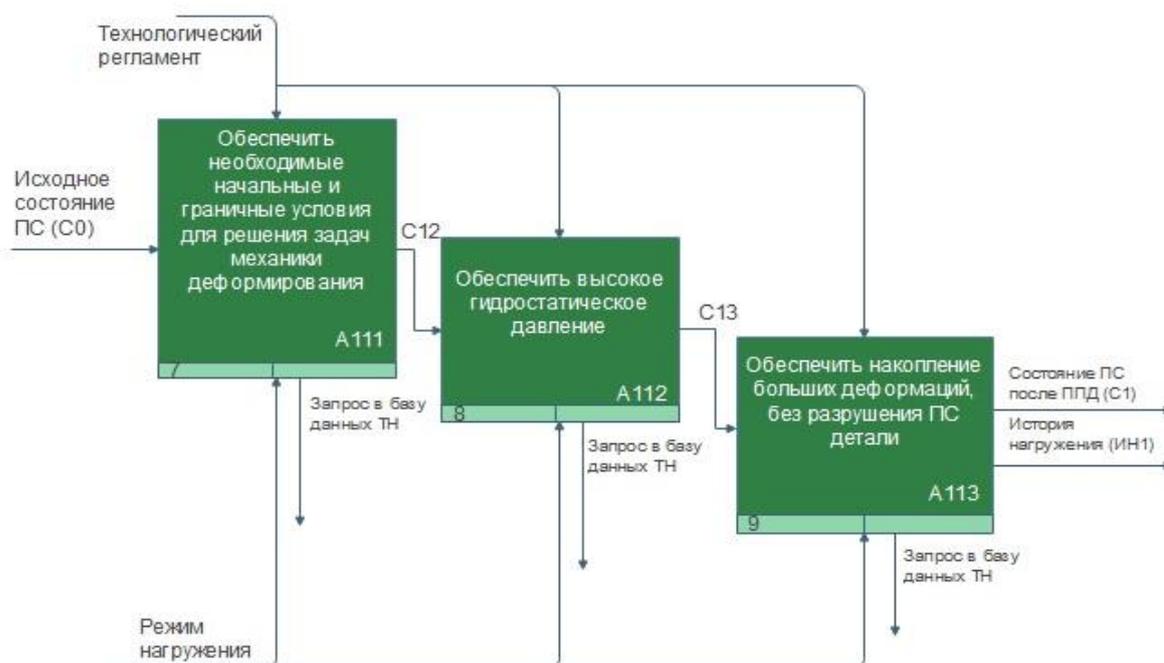


Рисунок 2.4 Декомпозиция диаграммы уровня A11

В таблицах 2.1-2.2 приведена семантика узлов и ярлыков в терминах и категориях механики ТН.

Таблица 2.1 Схема индексации узлов

Индекс узла	Индекс подузла	Семантика узлов
A0		Интенсифицировать напряженно-деформированного состояния в очаге деформации при ППД мультирадиусным роликом (МР-роликом)
A1, A2, A3		Блоки-потомки, детализирующие родительский блок A0
A1		Обеспечить интенсивное напряженно-деформированное состояние
	A11, A12,	Блоки-потомки, детализирующие блок A1
	A11	Обеспечить высокий упрочняющий эффект без разрушения поверхностного слоя (ПС) детали за счет создания высокого среднего нормального напряжения в очаге деформации
	A111, A112, A113	Блоки-потомки, детализирующие блок A11
	A111	Обеспечить необходимые начальные и граничные условия для решения задач механики деформирования
	A112	Обеспечить высокое гидростатическое давление
	A113	Обеспечить накопление деформаций без разрушения ПС детали
	A12	Обеспечить высокий уровень сжимающих остаточных напряжений в ПС детали за счет накопления больших деформаций
A2		Обеспечить качество поверхностного слоя
A3		Обеспечить циклическую долговечность

Таблица 2.2 Схема индексации ярлыков на функциональных схемах

Обозначение ярлыков	Семантика ярлыков
C0	Наследуемое состояние поверхностного слоя до стадии обработки ППД МР-роликом
C1	Состояние поверхностного слоя после стадии ППД МР-роликом
C11, C12, C13, C111	Текущее состояние поверхностного слоя на соответствующих промежуточных этапах стадии обработки ППД МР-роликом
-	Технологический регламент
-	Режим нагружения
ИН1	Трансформированная история нагружения, передаваемая на последующую стадию и представляющая собой информацию о характере накопления параметров состояния ПС на предыдущих стадиях нагружения, включая стадию ППД МР-роликом
Запрос в базу данных ТН	Запрос к базе данных технологического наследования по правилам формирования ОД

Таким образом, для разработанной структурной аналитической модели на стадии ППД МР-роликом характерно следующее:

1. Наличие исходного (наследуемого на предыдущих операциях механической обработки резанием) состояния ПС в виде C0.
2. Запрос к базе данных технологического наследования с целью получения информации о режимах обработки.
3. Наличие режима нагружения, назначаемого технологом.
4. Наличие технологического регламента.
5. Создание собственной наследственной информации (ИН1), трансформировавшейся на стадии ППД МР-роликом и впоследствии влияющей на усталость.
6. Состояние ПС после выполнения обработки ППД МР-роликом в виде C1.

В соответствии с разработанной структурной моделью решение задачи механики процесса ППД МР-роликом требует:

- описания начальных и граничных условий формирования ОД;
- описания этапов нагружения ПС инденторами МР-ролика в процессе обработки;
- описания постановки задачи МКЭ-моделирования;
- решения задачи и выявления закономерностей накопления деформаций, исчерпания запаса пластичности и формирования остаточных напряжений в зависимости от режима обработки ППД.

2.2 Феноменологическая модель ППД МР-роликом

Феноменологическая модель этапов нагружения ПС детали инденторами МР-ролика представлена по результатам теоретических и экспериментальных исследований.

2.2.1 Формирование очага деформации при ППД МР-роликом

При разработке МКЭ-модели и последующем расчете механического состояния ПС детали с учетом ТН важным является наличие информации, позволяющей сформировать требуемую совокупность начальных и граничных условий решения задачи. К наиболее важным условиям относятся: физико-механические свойства материала и геометрические профили очагов пластической деформации (ОД), возникающих в зоне контакта деформирующего инструмента с обрабатываемой деталью и являющихся носителями наследственной информации в ПС обрабатываемой детали.

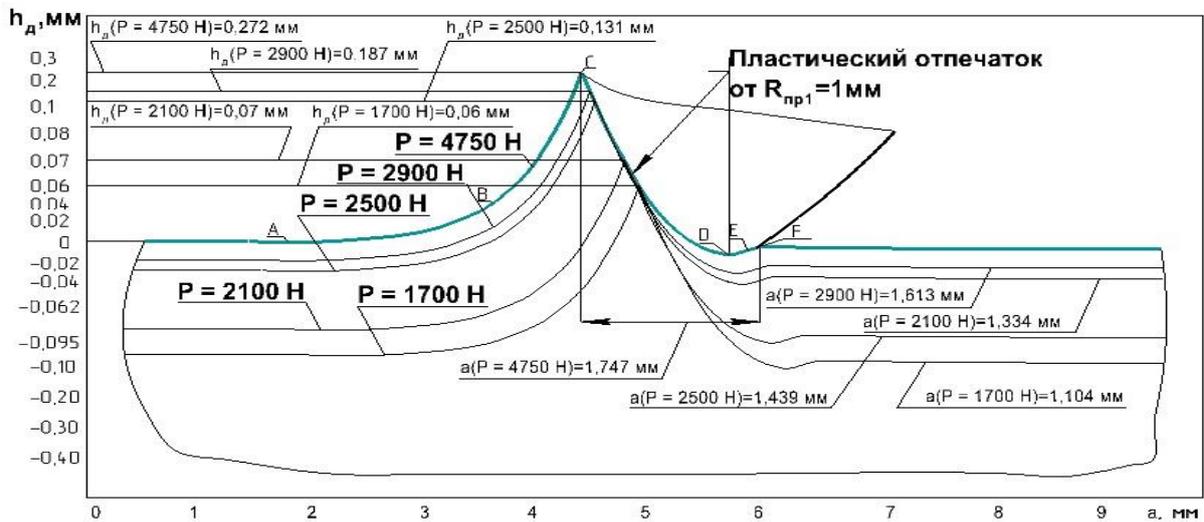
Кроме того, исследования контактных и внеконтактных зон ОД позволяет получить информацию о процессе пластического волнообразования металла. Для формирования представлений о геометрии очага деформации в процессе обработки был проведен эксперимент ППД МР-роликом, обеспечивший создание стационарного очага деформации. Для этого группа образцов из стали 45 Ø26 мм обрабатывались на токарном станке с ЧПУ по режимам, представленным в таблице 2.3. Включалось вращение образца, выполнялось внедрение МР-ролика и обработка на длину 60 мм, что обеспечивало стационарность процесса. Далее программными средствами станка с ЧПУ проводилось быстрое отключение подачи и быстрый отвод инструмента, в результате чего на образце сохранялись пластические отпечатки от рабочей части профиля МР-ролика. Для измерения геометрических параметров на полученные контактные и внеконтактные зоны очагов деформации был нанесен состав на основе эпоксидной смолы. После затвердевания состава слепки снимались с образца, разрезались в меридиональном направлении и шлифовались. После этого производилось фотографирование слепка, загрузка фотографий в графический редактор, масштабирование и выравнивание полученного изображения, и измерение геометрических параметров очага деформации.

Более подробно методика создания стационарного очага деформации и методики других локальных экспериментов, посвященных изучению особенностей формирования и трансформации очага деформации при ППД МР-роликом, изложена в главе 3, а результаты исследования представлены в главе 4.

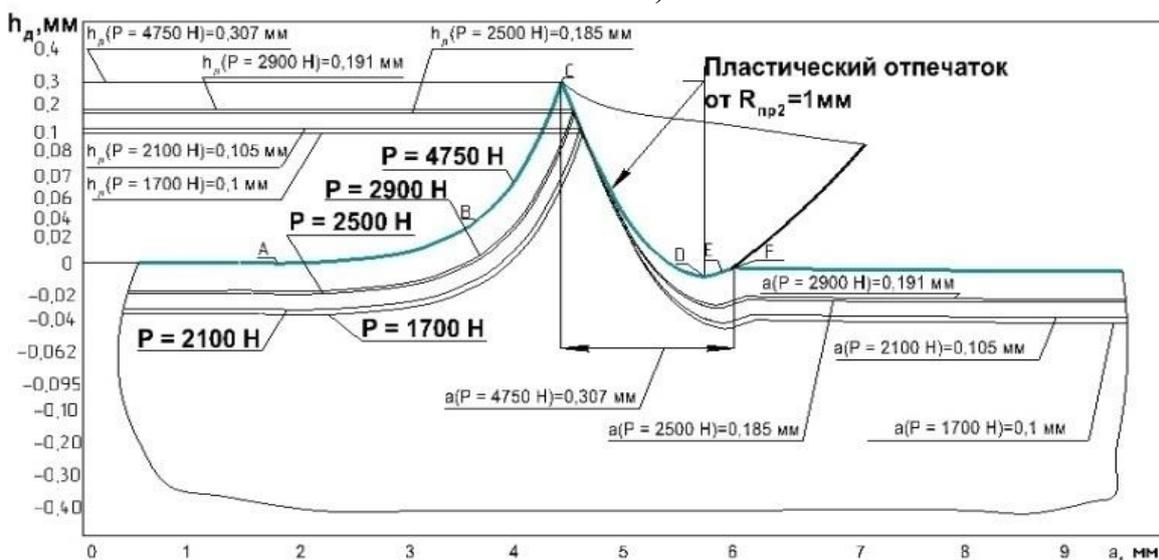
Таблица 2.3 Режимы обработки ППД МР-роликом

№ п/п	Режим обработки		
	Подача, S, мм/об	Частота вращения, n, об/мин	Усилие, P, Н
1	0,05	630	1700
2			2100
3			2900
4			2500
5	0,07	800	4750

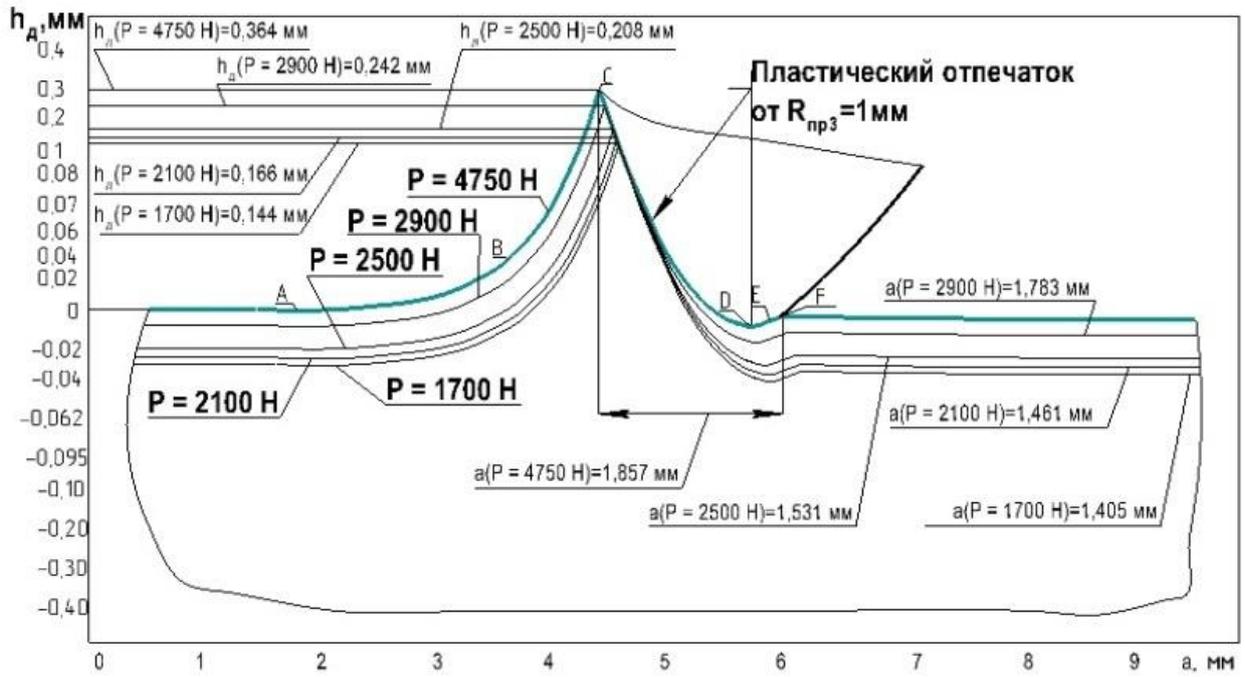
На рисунке 2.5 представлены геометрические параметры контактных и внеконтактных зон очагов деформации при обработке МР-роликом в зависимости от усилия внедрения.



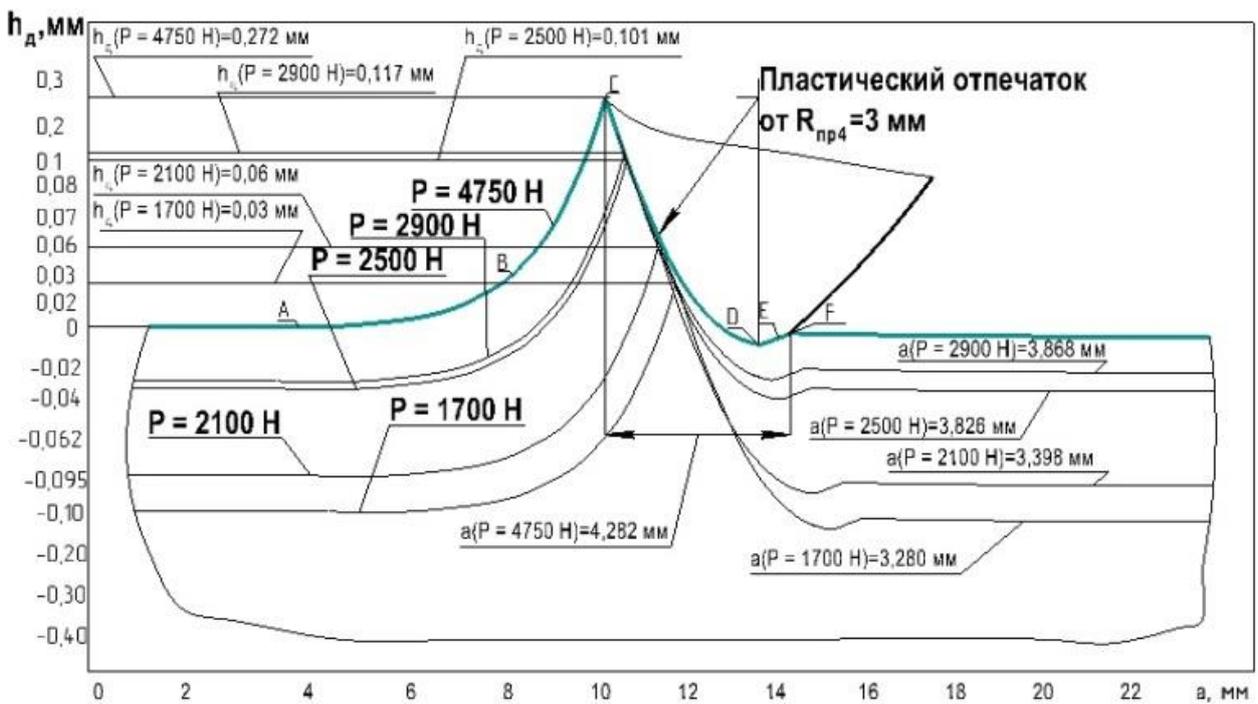
а)



б)



в)



г)

Рисунок 2.5 Геометрия пластических отпечатков от МР-ролика в зависимости от усилия (P , Н): а, б, в, г – пластические отпечатки от инденторов $R_{пр1}$, $R_{пр2}$, $R_{пр3}$ и $R_{пр4}$ соответственно

Полученные данные о формах и размерах зон ОД в дальнейшем были использованы для разработки феноменологической модели и применены в качестве начальных и граничных условий при разработке МКЭ-моделей процесса ППД МР-роликом, расчете и анализе механического состояния с учетом ТН поверхностного слоя детали.

2.2.2 Этапы нагружения поверхностного слоя детали инденторами мультирадиусного ролика

Согласно разработанной феноменологической модели формирования свойств ПС детали, приведенной ниже, на стадии ППД МР-роликом процесс нагружения ПС детали выглядит следующим образом.

Стадия ППД МР-роликом разбивается на 4 этапа нагружения ПС детали, что соответствует количеству деформирующих инденторов МР-ролика и последовательности их взаимодействия с ПС детали.

Исходя из механических представлений, каждый из 4 этапов нагружения ПС сопровождается: возникновением ОД; накоплением пластических деформаций; постепенным исчерпанием запаса пластичности; возникновением и трансформацией ОН; появлением зон перекрытий очагов деформации с преобладающим высоким гидростатическим давлением; формированием ПС с определенными наследуемыми свойствами. В свою очередь, 4 этапа содержат в себе в общей сложности 10 подэтапов, которые описывают различные взаимосвязанные между собой физико-механические процессы, происходящие во время нагружения инденторами МР-ролика ПС детали. К таковым процессам относятся: зарождение, рост, формоизменение ОД; зарождение, рост пластической волны; обратное течение металла.

Важно отметить, что в результате нагружения ПС инденторами МР-ролика образуются три зоны перекрытия очагов деформации:

- 1-я зона квазимонотонной деформации: перекрытие очагов деформации $ОД_1$ и $ОД_2$;
- 2-я зона квазимонотонной деформации: перекрытие очагов деформации $ОД_2$ и $ОД_3$;
- 3-я зона квазимонотонной деформации: перекрытие очагов деформации $ОД_3$ и $ОД_4$.

На границах зон перекрытия очагов деформации происходит смена знака деформаций и соответственно, частичное залечивание накопленных дефектов. В процессе обработки накапливается деформация $\Lambda_{ППД}$, частично исчерпывается запас пластичности на величину $\Psi_{ППД}$, в ПС возникают остаточные напряжения, описываемые тензором $[T_{ост}]_{ППД}$, в результате формируется новое состояние ПС детали. При этом, исчерпание

запаса пластичности далее было описано в категориях критерия исчерпания запаса пластичности Калпина-Филиппова, учитывающего как накопление деформации, так и накопление поврежденности, о чем подробно описано в главе 1. Теоретические и экспериментальные исследования позволили сформировать феноменологические представления о сложном характере процесса и выявить закономерности формирования поверхностного слоя при обработке МР-роликом. Важно отметить, что в основу создания схемы нагружения ПС детали и феноменологической модели положены результаты экспериментальных и теоретических исследований пластического течения металла и процесса обкатывания МР-роликом в целом.

2.2.2.1 Первый этап нагружения ПС МР-роликом: внедрение и перемещение деформирующего индентора $R_{пр1}$

На первом этапе нагружения ПС первым из четырех деформирующих элементов МР-ролика, внедряющимся на глубину $h_{д1}$ и перемещающимся в направлении подачи, является индентор ($R_{пр1} = 1$ мм). При его возникновении первый ассиметричный очаг деформации (ОД₁) с контуром $-A_1B_1C_1D_1E_1F_1G_1$ (рис. 2.6, а, б), по форме и размерам идентичный ОД при ППД торовым роликом. ОД₁ можно представить и описать рядом характерных линий контура (рис. 2.7, б) [83]:

- криволинейной линией $A_1B_1C_1$, описывающей переднюю внеконтактную поверхность ОД. Точка A_1 соответствует началу пластического подъема металла, в точке B_1 происходит смена кривизны этой линии, а точка C_1 соответствует наибольшему подъему металла в виде пластической волны перед индентором ($R_{пр1}$) МР-ролика;

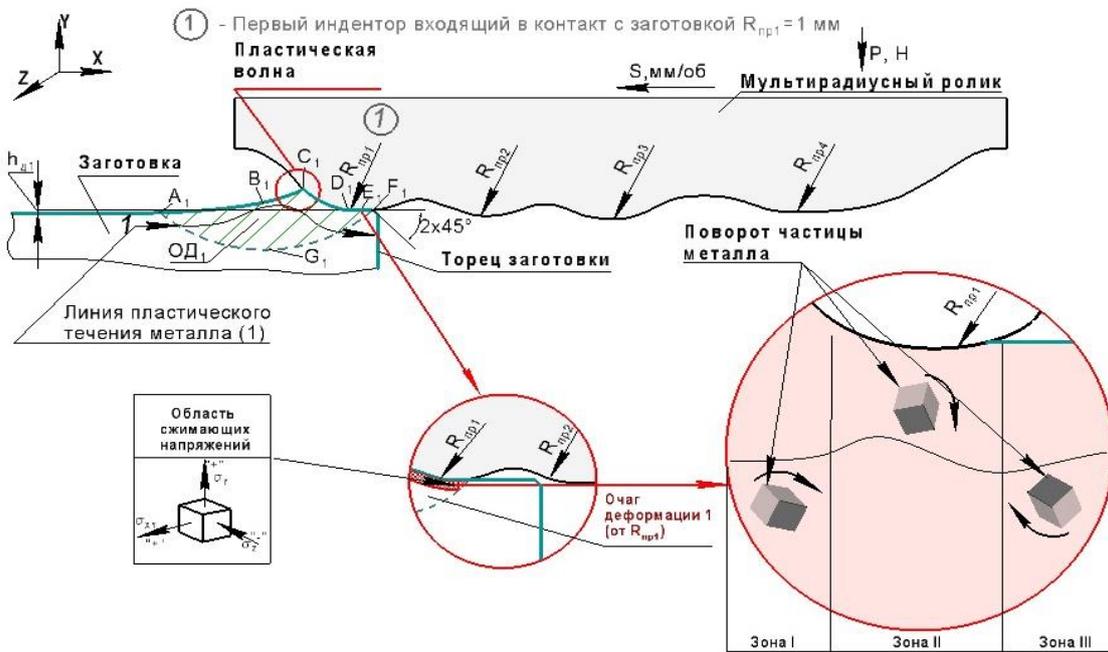
- криволинейной линией $C_1D_1E_1$, описывающей заднюю контактную поверхность ОД и контур индентора ($R_{пр1}$) МР-ролика. Точка D_1 соответствует наибольшей глубине внедрения ($h_{д1}$) индентора ($R_{пр1}$);

- криволинейной линией E_1F_1 , описывающей заднюю внеконтактную поверхность ОД;

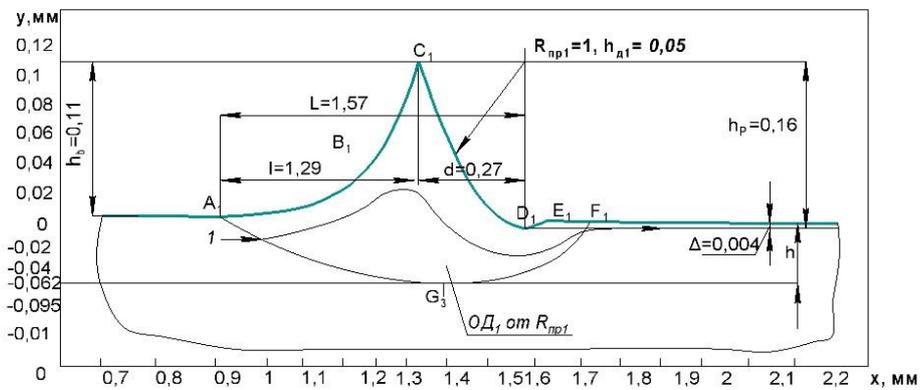
- криволинейной линией $F_1G_1A_1$, описывающей границу зоны пластического течения металла. Левее этой линии металл находится в упругом состоянии, правее – в состоянии пластического течения. Точка G_1 соответствует наибольшей глубине распространения пластической деформации;

— криволинейной линией G_1F_1 , вдоль которой заканчивается пластическое течение металла.

Анализируя напряженно-деформированное состояние по осям XU при внедрении и перемещении индентора R_{np1} можно сказать следующее: в зоне передней внеконтактной поверхности OD_1 (криволинейная $A_1B_1C_1$, рис. 2.6, а) преобладают растягивающие напряжения; в зоне задней контактной поверхности OD и контура индентора (R_{np1}) МР-ролика (криволинейная $C_1D_1E_1$, рис. 2.6, а), а также под самим индентором (G_1F_1 , рис. 2.6, а) преобладают сжимающие напряжения; далее, на границе зоны пластического течения металла (криволинейная $F_1G_1A_1$, рис. 2.6, а) происходит смена сжимающих напряжений на растягивающие.



а)



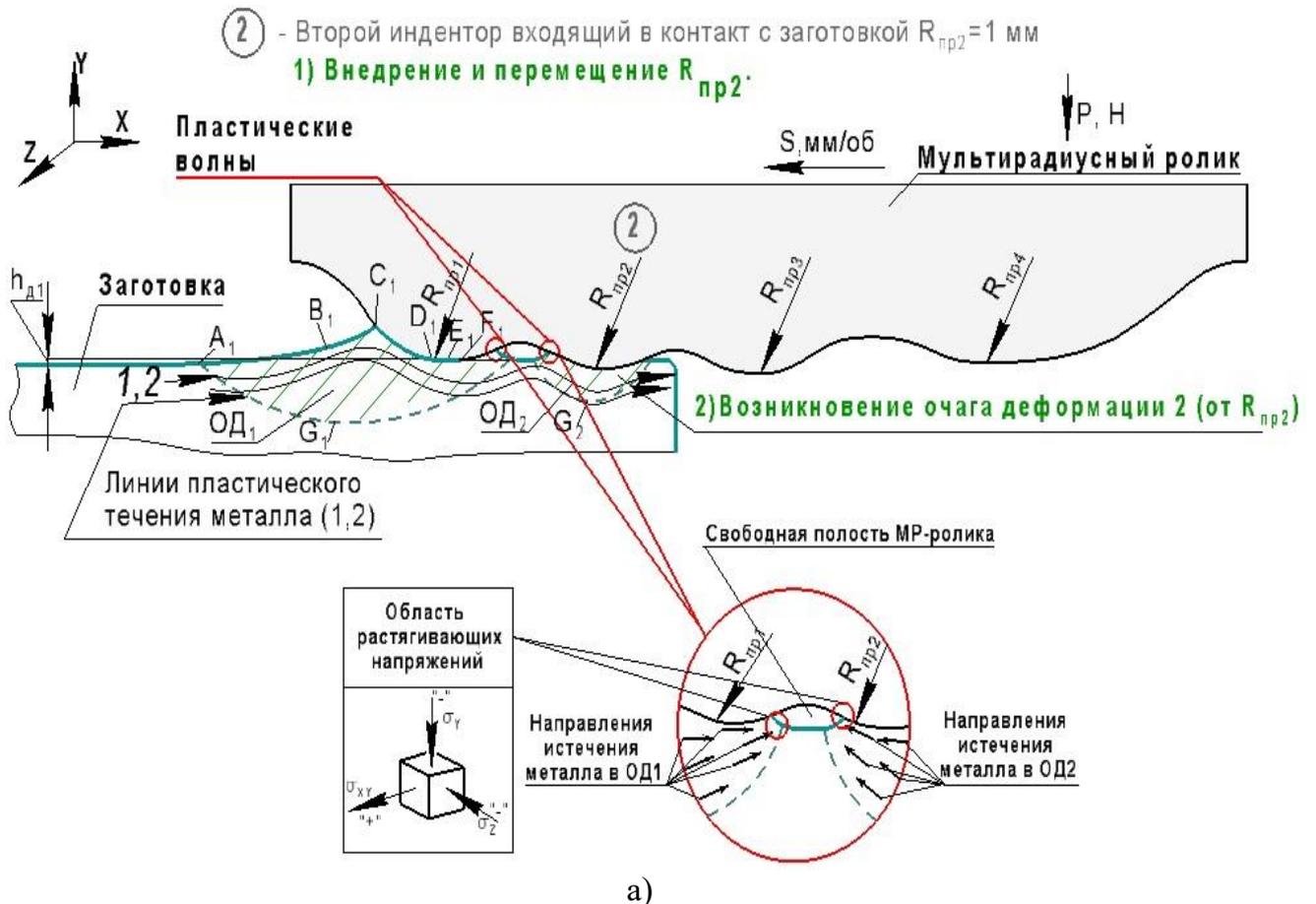
б)

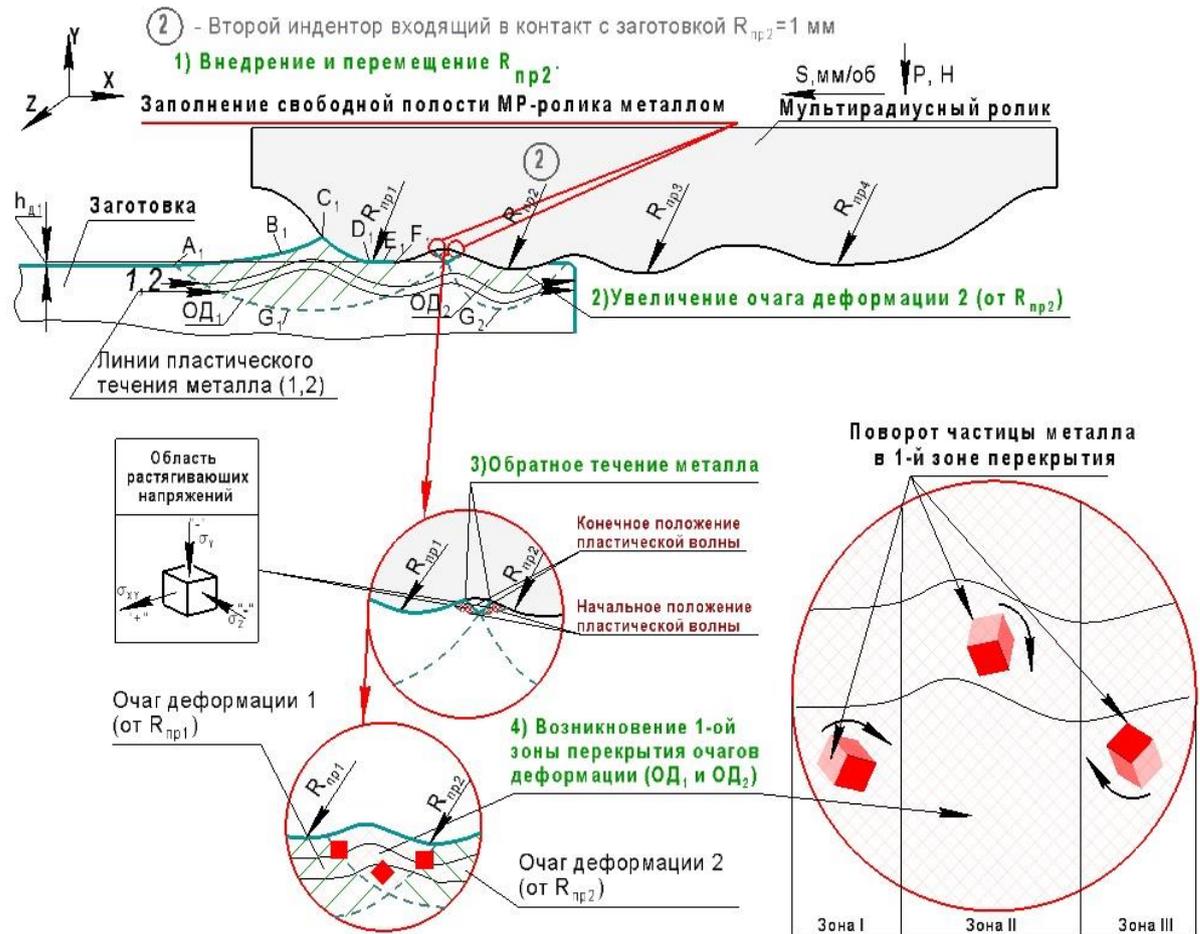
Рисунок 2.6 Схема первого этапа нагружения ПС: а) схема внедрения и перемещения первого индентора с профильным радиусом $R_{np1} = 1$ мм и возникновения первого OD_1 ; б) схема очага деформации OD_1 от индентора R_{np1}

2.2.2.2 Второй этап нагружения ПС МР-роликом: внедрение и перемещение деформирующего индентора $R_{пр2}$

По мере дальнейшей обработки МР-роликом в поверхностный слой детали внедряется и перемещается деформирующий индентор с профильным радиусом $R_{пр2} = 1$ мм (рис. 2.7, а). При его внедрении возникает второй ассиметричный очаг деформации (ОД₂) с контуром - $A_2B_2C_2D_2E_2F_2G_2$ (рис. 2.7), а также пластическая волна в зоне передней внеконтактной поверхности очага деформации. ОД₂ можно представить и описать рядом характерных линий контура, идентичными с контурами $A_1B_1C_1D_1E_1F_1G_1$ и описанными выше.

По мере внедрения второго индентора на величину действительного натяга $h_{д2} = 0,10$ мм и последующего перемещения в направлении подачи, происходит рост очагов деформации ОД₁ и ОД₂) (рис. 2.7, а). В области задней внеконтактной поверхности ОД₁ (криволинейная E_1F_1 , рис. 2.7, а) под действием интенсивных напряжений, обусловленных схемой НДС и конструкцией ролика, происходит обратное течение металла, сопровождающееся сменой сжимающих на растягивающие напряжения (рис. 2.7, б).





б)

Рисунок 2.7 Схема второго этапа нагружения ПС: а) схема внедрения и перемещения второго индентора с профильным радиусом $R_{пр2} = 1$ мм; б) схема заполнения свободной полости и образования первой зоны перекрытия между очагами деформации $ОД_1$ и $ОД_2$

Как только длина передней внеконтактной поверхности впереди $R_{пр2}$ достигает зоны вторичного течения металла от первого профиля, начинается интенсивное заполнение металлом полости между инденторами $R_{пр1}$ и $R_{пр2}$ МР-ролика (рис. 2.7, б). При этом очаги деформации $ОД_1$ и $ОД_2$ продолжают увеличиваться в размерах в глубину ПС в направлении подачи. В момент встречи двух потоков металла происходит сложное «перемешивание» частиц металла, вследствие чего образуется первая зона перекрытия очагов деформации с высоким гидростатическим давлением (рис. 2.8); в этой зоне происходит частичное залечивание дефектов металла.

Важно отметить, что зоны перекрытия потоков металла от предыдущего и следующего за ним инденторов образуются между инденторами $R_{пр1}$ и $R_{пр2}$, $R_{пр2}$ и $R_{пр3}$, $R_{пр3}$ и $R_{пр4}$. На взгляд автора, характер пластического течения металла в этих зонах можно описать, воспользовавшись теоретическими положениями обработки металлов давлением.

ем в открытых штампах [267]. Можно предположить, что рабочая полость между инденторами выполняет функцию, аналогичную рабочей полости ручья штампа при объемной штамповке. В тоже время, деформирующие элементы с профильными радиусами ($R_{пр1}$, $R_{пр2}$, $R_{пр3}$ и $R_{пр4}$) будут выполнять функцию, аналогичную заусенечным канавкам при штамповке в открытых штампах, и являются регуляторами давления.

Здесь важными являются два обстоятельства.

Первое. В начальный период происходит интенсивное, обусловленное большими натягами инденторов, пластическое течение металла за предыдущим и впереди следующего за ним индентора. За счет этого происходит заполнение металлом рабочей полости между инденторами ввиду меньшего сопротивления истечению потока металла в сравнении с истечением в глубину ПС и в направлении подачи. Происходит постепенное заполнение этой полости исходя из условий процесса обработки. По мере заполнения рабочей полости возникает существенно большее сопротивление истечению металла в эту полость. Металл в этой полости аналогичен металлу в рабочей полости ручья штампа; в этот момент за счет поджатия металлом уже заполненной рабочей полости происходит интенсивное течение металла в глубину поверхностного слоя и в направлении подачи; в совокупности это увеличивает размеры очага деформации.

Второе. Заполненная металлом рабочая полость между инденторами приводит к большей интенсивности пластического течения за счет создания условий, близких к всестороннему сжатию. Это говорит о возникновении в этой зоне высокого гидростатического давления и последующему интенсивному пластическому течению металла без его разрушения.

Иными словами, рабочие полости между инденторами МР-ролика работают, как рабочие полости ручья штампа, содействуя созданию сопротивления истечению металла, зон с высоким гидростатическим давлением и большей интенсивности течения металла в целом в очаге деформации.

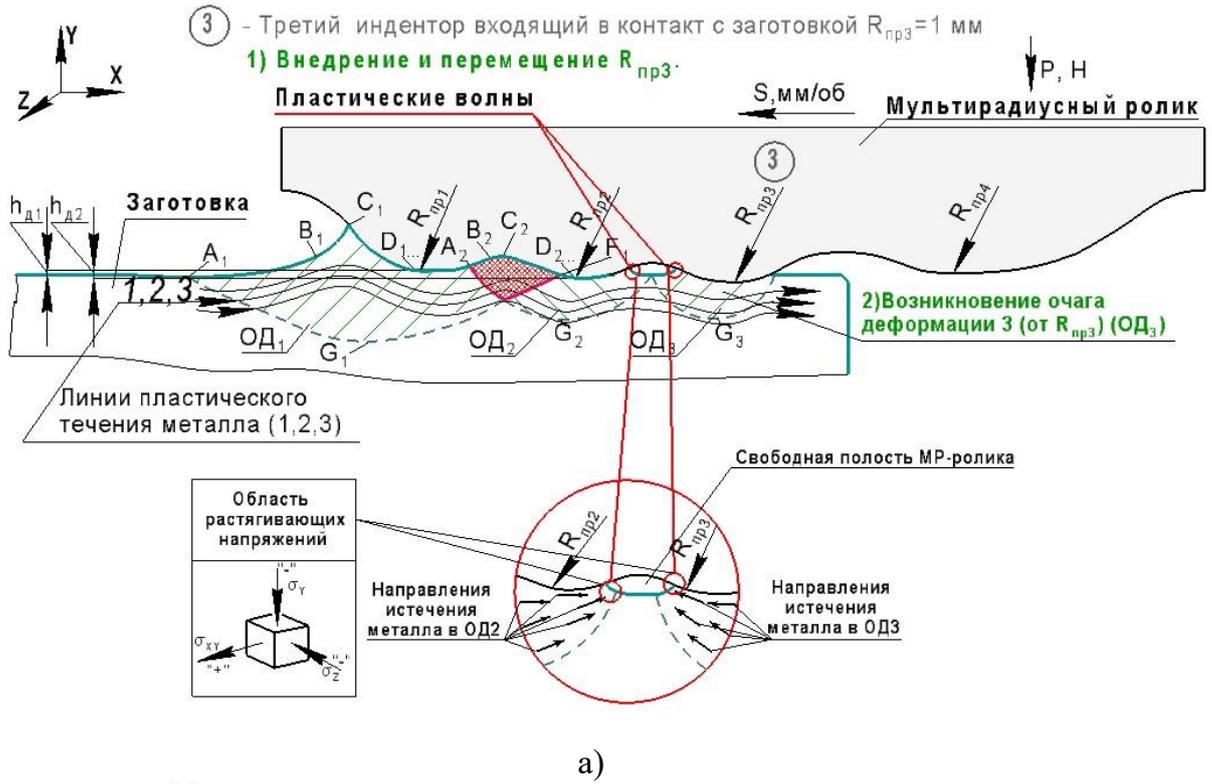
Очевидно, что выявленные закономерности позволяют использовать их для создания широкой гаммы сложнопрофильных деформирующих инструментов; в данном случае речь идет о возможности варьирования в широких пределах геометрии и количества инденторов деформирующего инструмента. Выявлено и далее в 4-й главе будет показано, что именно в свободных полостях МР-ролика локализуются большие напряжения, изменяется структура металла. Сначала деформируются наиболее благоприятно

ориентированные зерна (в которых плоскости скольжения составляют 45°), затем в зонах с наибольшими напряжениями (зоны перекрытия очагов деформации), в которых наиболее интенсивное течение металла; при этом значительно изменяется форма зерен, происходит вытягивание, деформирование их границ, фрагментация. Вместе с изменением формы зерен при значительных степенях деформации плоскости скольжения зерен сплавов, имеющих преимущественно поликристаллическое строение, стремятся соединиться с направлением течения металла, создается определенная текстура, вызывающая у поликристаллов анизотропию свойств. В свою очередь, данное обстоятельство позволяет предполагать, что упрочнение под инденторами будет меньше, чем в свободных полостях МР-ролика, в которых НДС наиболее интенсивно.

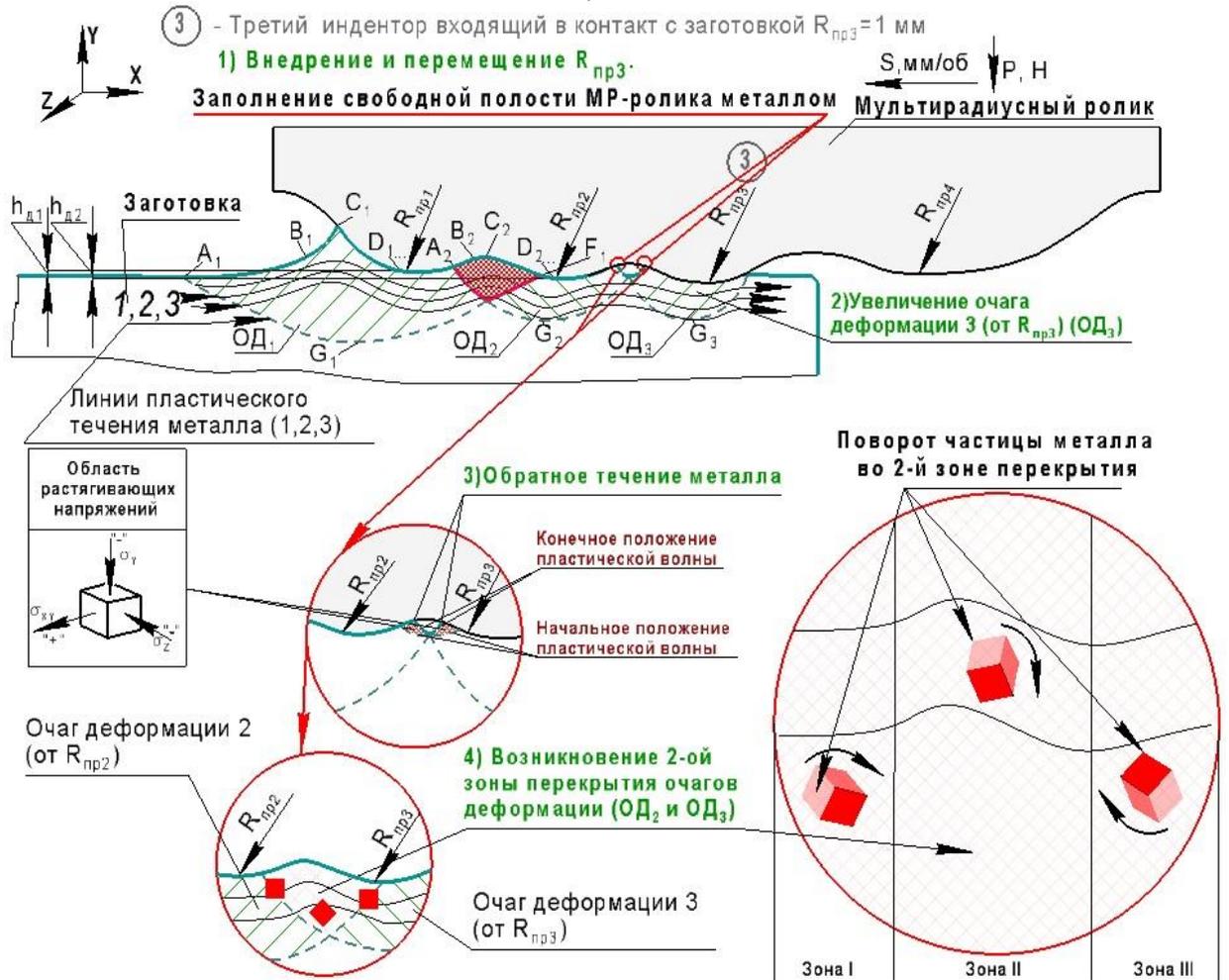
2.2.2.3 Третий этап нагружения ПС МР-роликом: внедрение и перемещение деформирующего индентора $R_{\text{пр3}}$

Третий индентор МР-ролика ($R_{\text{пр3}} = 1 \text{ мм}$) начинает работу в условиях интенсивного пластического течения от предыдущих двух инденторов (рис. 2.8, а). В соответствии с картиной течения металла при внедрении индентора с $R_{\text{пр3}}$ с наибольшим действительным натягом $h_{\text{д3}}=0,15 \text{ мм}$ впереди него возникает пластическая волна, увеличивающаяся в размерах по мере перемещения инструмента.

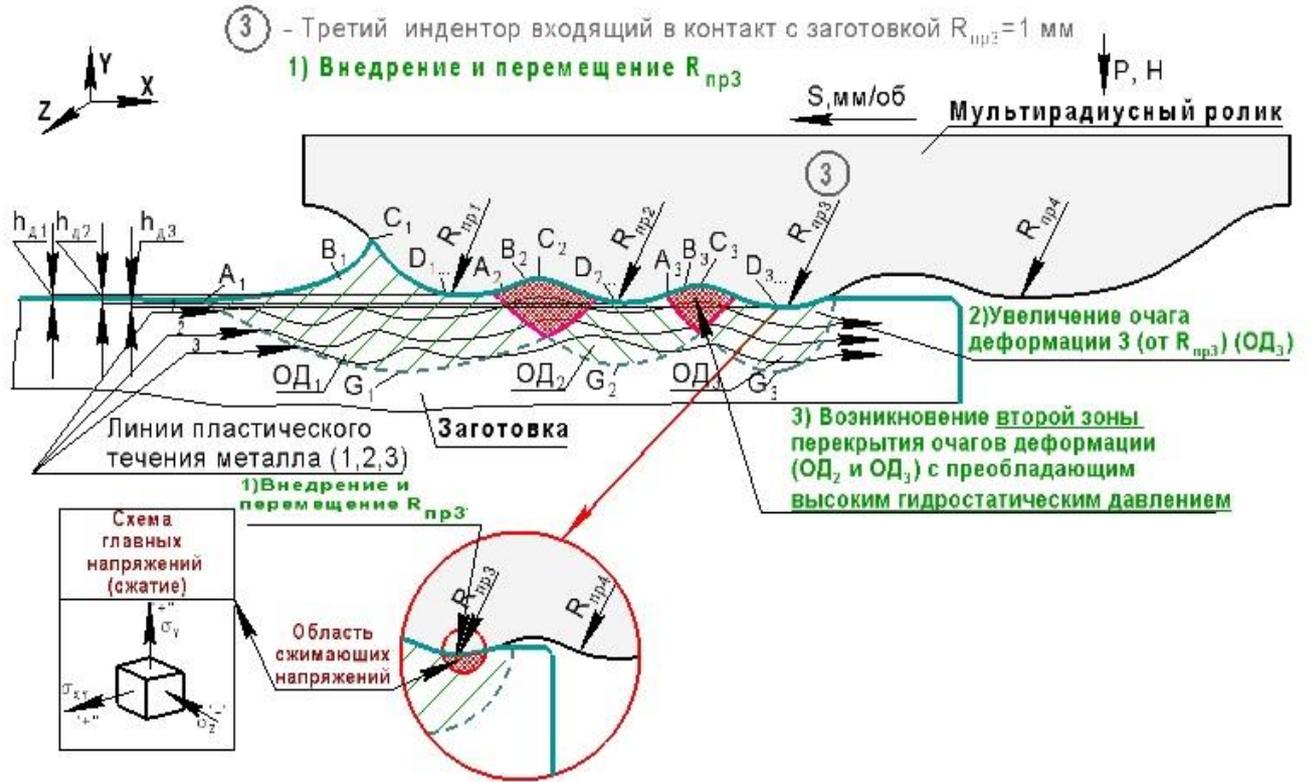
Важно отметить, что несмотря на большой натяг, существенно превышающий допустимый для ППД (не более $0,05 \text{ мм}$), разрушения поверхности детали не происходит ввиду вышеописанных закономерностей. В результате внедрения и перемещения в направлении подачи возникает третий ассиметричный очаг деформации (ОД_3) с контуром – $A_3B_3C_3D_3E_3F_3G_3$ (рис. 2.8). Аналогичным образом по мере внедрения и перемещения $R_{\text{пр3}}$ происходит обратное течение металла. Как только длина передней внеконтактной поверхности впереди индентора достигает зоны вторичного течения металла от второго профиля, начинается интенсивное заполнение металлом полости между инденторами МР-ролика $R_{\text{пр2}}$ и $R_{\text{пр3}}$ (как и было описано выше, см. рис. 2.8, б). В результате заполнения свободной полости металлом между $R_{\text{пр2}}$ и $R_{\text{пр3}}$ и увеличением размеров очагов деформации от инденторов, возникает вторая зона перекрытия ОД (ОД_2 и ОД_3 , рис. 2.8, в), в которой происходит перемешивание потоков металла, а деформация условной частицы металла неоднократно меняет свой знак (рис. 2.8, г).



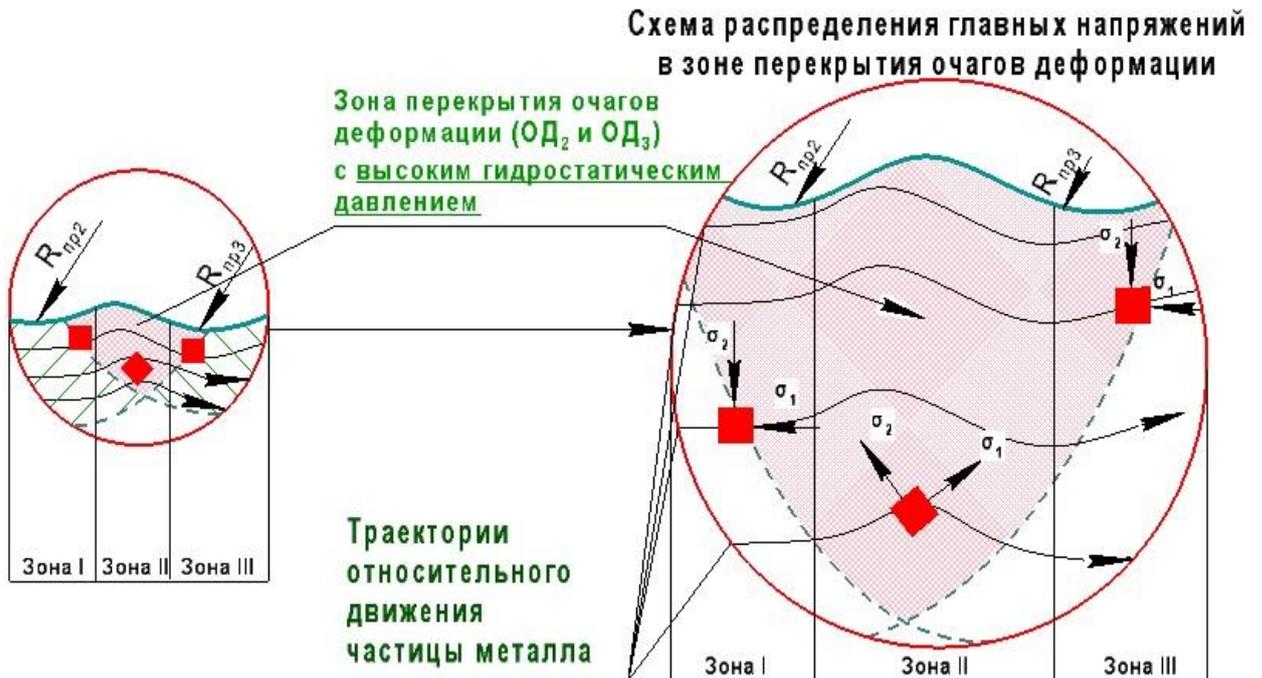
а)



б)



в)



г)

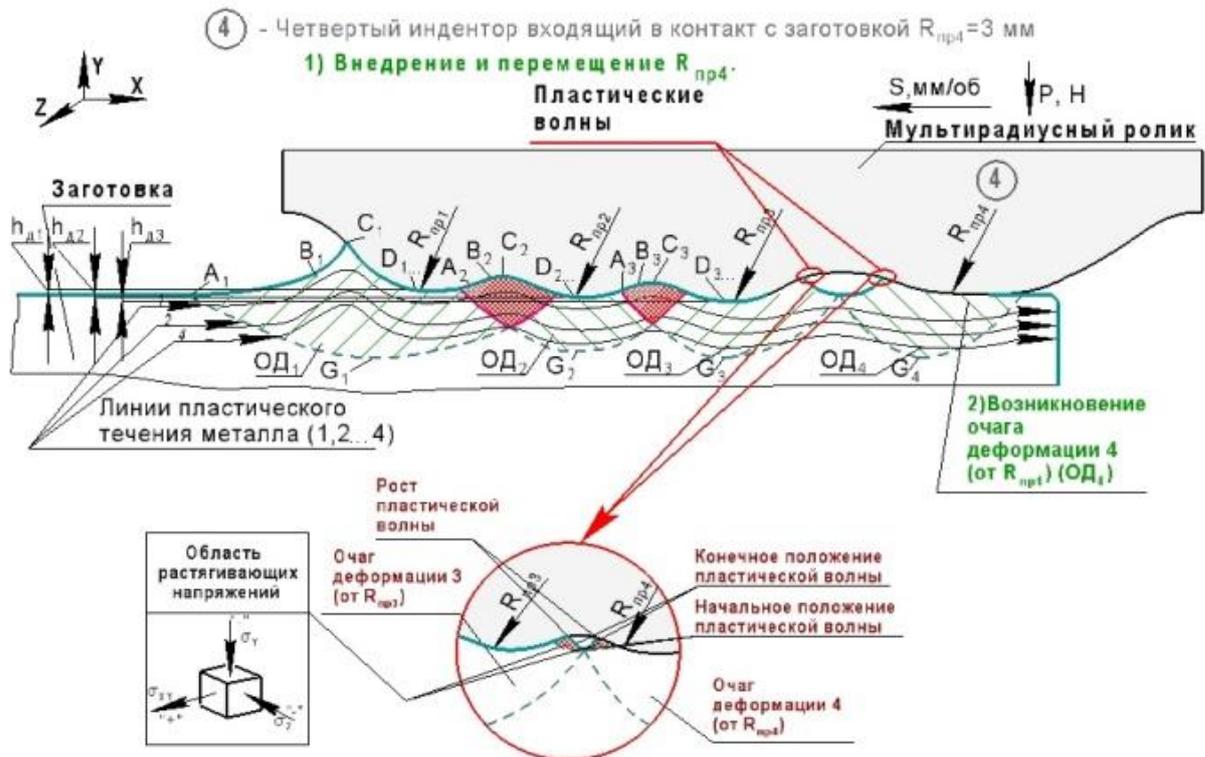
Рисунок 2.8 Схема третьего этапа нагружения ПС индентором с $R_{пр3}$: а) схема внедрения и перемещения индентора и возникновения $ОД_3$; б) схема заполнения свободной полости между $R_{пр2}$ и $R_{пр3}$; в) схема возникновения второй зоны перекрытия очагов деформации; г) схема главных напряжений во второй зоне перекрытия $ОД$

2.2.2.4 Четвертый этап нагружения ПС МР-роликом: внедрение и перемещение деформирующего индентора $R_{пр4}$

Последним деформирующим элементом, входящим в контакт с поверхностью обрабатываемой детали и выполняющим «сглаживающую пластические волны от малых инденторов» функцию, является индентор с профильным радиусом $R_{пр4} = 3$ мм. В соответствии с картиной течения металла при его внедрении впереди него возникает пластическая волна, увеличивающаяся в размерах по мере перемещения инструмента в направлении подачи. В результате возникает четвертый ассиметричный очаг деформации (ОД₄) с контуром – $A_4B_4C_4D_4E_4F_4G_4$ (рис. 2.9, а). По мере дальнейшего внедрения и перемещения индентора аналогичным вышеописанным образом происходит заполнение металлом свободной полости между $R_{пр3}$ и $R_{пр4}$, в результате чего образуется третья зона перекрытия очагов деформации (ОД₃ и ОД₄, рис. 2.9, б).

Таким образом, в результате работы всех четырех инденторов МР-ролика, образуются 3 зоны перекрытия очагов деформации (рис 2.9, в):

- 1-ая зона перекрытия между ОД₁ и ОД₂;
- 2-ая зона перекрытия между ОД₂ и ОД₃;
- 3-ия зона перекрытия между ОД₃ и ОД₄.



а)

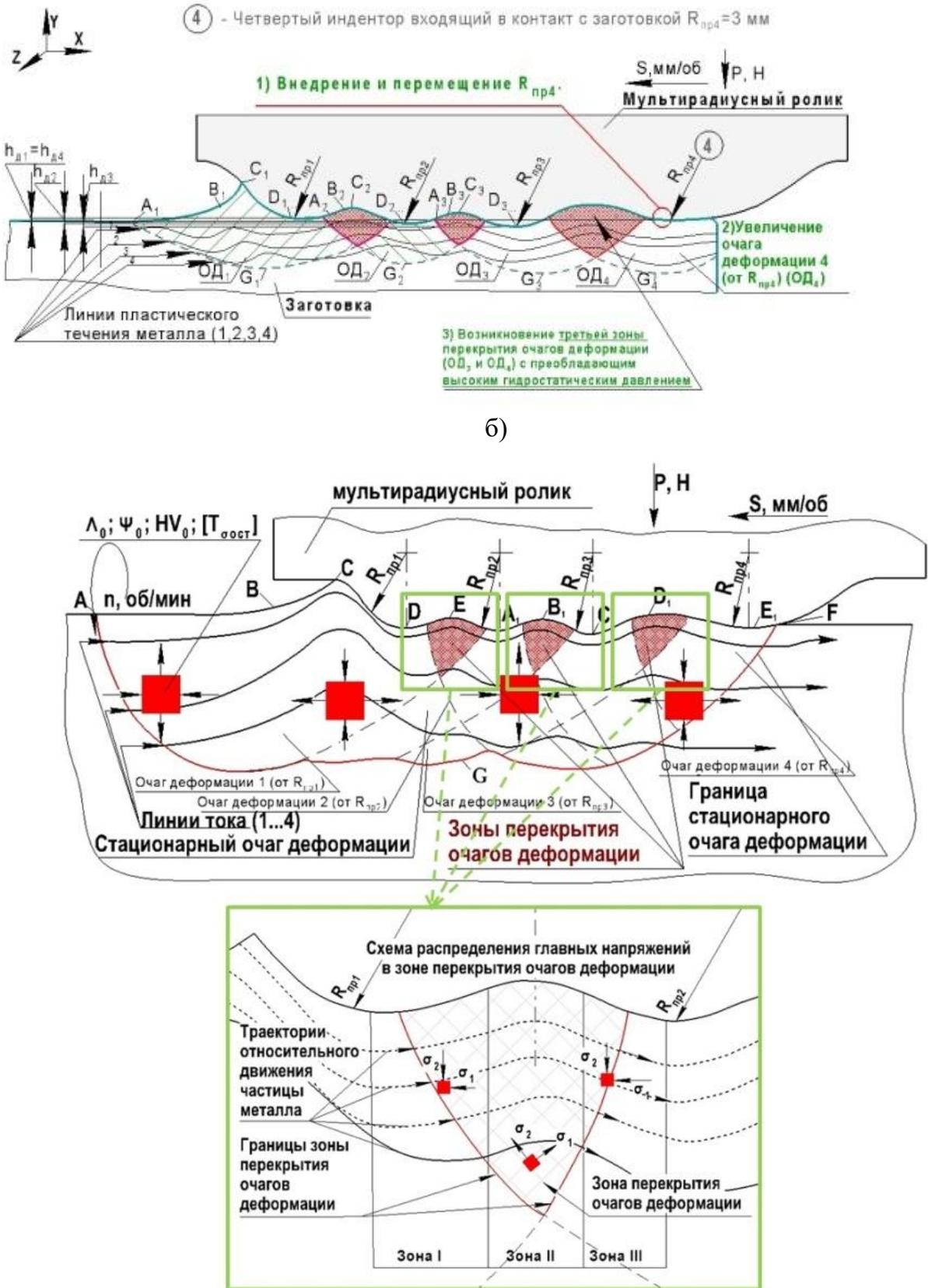


Рисунок 2.9 Схема четвертого этапа нагружения ПС индентором с профильным радиусом $R_{пр4}$: а) схема внедрения индентора и возникновения OD_4 ; б) схема возникновения третьей зоны перекрытия очагов деформации (OD_3 и OD_4); в) схема стационарного процесса обработки МР-роликом

Важно отметить, что после внедрения индентора с профильным радиусом $R_{пр4}$, процесс обработки ППД становится стационарным (работают все четыре индентора МР-ролика). В результате этого в ПС заготовки создается единый стационарный очаг деформации с характерными зонами перекрытия очагов деформации, описанными выше. При этом, пластическая волна, перемещающаяся впереди $R_{пр1}$, в процессе обработки «сглаживается» индентором с $R_{пр4}$.

Выявлено, что каждую зону перекрытия очагов деформации можно разделить на характерные, условные 3 зоны (рис 2.9, в):

— зона I – зона задней контактной поверхности ОД, в которую входит условная частица металла с некоторыми уже накопленными свойствами. На границе входа в данную зону происходит скачкообразная смена знака деформации на отрицательный «-»;

— зона II – зона между инденторами (полость МР-ролика между инденторами, заполняемая металлом, аналогичная заусенечной канавке при штамповке и выполняющая функцию регулятора давления), в которой частица металла накапливает свойства и находится в условиях растягивающих напряжений;

— зона III – зона задней внеконтактной поверхности ОД, с опережающей пластической деформацией и сжимающими напряжениями. На выходе из данной зоны частица металла имеет накопленные свойства и меняет знак деформации с положительного «+» на отрицательный «-».

Таким образом, разработка феноменологической модели позволила выявить ряд закономерностей:

1. В процессе ППД при нагружении поверхностного слоя детали инденторами образуются 4 очага деформации, что соответствует числу ДЭ. В процессе обработки МР-роликом, совокупность четырех очагов деформации ($ОД_1$, $ОД_2$, $ОД_3$ и $ОД_4$) в результате создает единый стационарный очаг деформации, который в процессе обработки перемещается вместе с инструментом.

2. После внедрения и перемещения трех инденторов МР-ролика ($R_{пр1}$, $R_{пр2}$, $R_{пр3}$) размеры и кривизна пластической волны перед первым индентором увеличиваются. Однако, даже при таких больших натягах на каждый из трех инденторов (0,05; 0,10 и 0,15 мм) разрушения металла поверхностного слоя не происходит ввиду физических закономерностей, описанных выше.

3. Инденторы $R_{\text{пр}1}$, $R_{\text{пр}2}$ и $R_{\text{пр}3}$ с профильными радиусами равными 1 мм, выполняют деформирующую (упрочняющую) функцию, а четвертый индентор $R_{\text{пр}4}$ с профильным радиусом 3 мм – сглаживающую.

4. Пластическое течение металла происходит «волнообразно», повторяя рабочий контур МР-ролика. В совокупном стационарном очаге деформации на всю его глубину происходит интенсивное накопление деформаций в условиях действия высокого гидростатического давления.

5. Наибольшие напряжения и деформации локализуются в свободных полостях МР-ролика, где образуются зоны перекрытия очагов деформации; в них потоки металла «перемешиваются». Тем самым, обеспечивается выполнение функции регулирования давления по аналогии с схемой обработки давлением в открытых штампах.

Разработанная феноменологическая модель требует всесторонней оценки на адекватность. Одним из методов, позволяющих описать напряженно-деформированное состояние в различных зонах очага деформации, включая зоны перекрытия, является метод конечных элементов. Наряду с этим появляется возможность расчета основных тензорных интегральных параметров механического состояния металла поверхностного слоя детали.

2.3 Постановка задачи МКЭ моделирования процесса ППД МР-роликом

Оценка механического состояния очага деформации при обработке МР-роликом проводилась путем МКЭ-моделирования в *ANSYS Mechanical APDL*. В качестве конечных элементов был выбран двумерный вязкоупругий элемент с 4-мя узлами *VISCO106*, используемый для решения задач пластичности с большими деформациями. Известно, что дискретность разбиения конечно-элементной модели определяет качество получаемых при моделировании результатов. Поэтому размер конечных элементов составил 0,30 мм. Начальными и граничными условиями для МКЭ-моделирования являлись:

— физические и механические свойства стали 45 (ГОСТ 1050-88) (табл.2.4): модуль Юнга E , характеризующий угол наклона упругого участка α ; плотность ρ ; коэффициент Пуассона ν ; коэффициент трения η ; кривая течения $\sigma = \sigma(\varepsilon)$; диаграмма пластичности $A_p = A_p(I)$;

— форма и геометрические размеры очага деформации, возникающего от воздействия инденторов МР-ролика (табл. 2.5).

Таблица 2.4 Физические и механические свойства металла и параметры кривой течения (сталь 45, ГОСТ 1050-88, исходная 160-180 HV)

Модуль Юнга	Е, МПа	2×10^{11}
Плотность	ρ , кг/м ³	7800
Коэффициент Пуассона	ν	0,3
Коэффициент трения	η	0,21
Экстраполированный предел текучести	$\sigma_{эт}$, МПа	$3,66 \times 10^8$
Тангенциальный модуль	$T_{мод}$, МПа	$2,596 \times 10^6$

Таблица 2.5 Условия моделирования механики ОД при ППД МР-роликом

Геометрия очага деформации (ОД), при усилии обкатывания 2500 Н				
L , мм*	l , мм*	d , мм*	d_1 , мм*	Δ *
Очаг деформации №1 от $R_{пр1}$ (ОД ₁)				
1,354	0,131	1,222	0,101	0,002
Очаг деформации № 2 от $R_{пр2}$ (ОД ₂)				
1,531	0,149	0,277	0,105	0,003
Очаг деформации № 3 от $R_{пр3}$ (ОД ₃)				
1,774	1,296	1,581	0,154	0,004
Очаг деформации №4 от $R_{пр4}$ (ОД ₄)				
1,819	0,164	1,654	0,215	0,038

*Примечание к таблице 2.5: L – длина передней поверхности ОД; l – длина поверхности от точки начала пластической волны до ее вершины; d – длина передней контактной поверхности МР-ролика; d_1 – длина задней поверхности ОД; Δ – упруго-пластическое восстановление металла

Исходная характеристика металла описывается кривой упрочнения $\sigma_s = \sigma_s(\Lambda)$, кривой предельной пластичности $\Lambda_p = \Lambda_p(\Pi)$ и диаграммой циклической трещиностойкости $V = V(K)$ в координатах: «коэффициент интенсивности напряжений K – скорость роста усталостной трещины V ». В процессе исследований кривая течения аппроксимировалась по 2-м схемам: мультилинейной и билинейной. Исследования показали, что использование мультилинейной аппроксимации кривой течения существенно не повысило качество результатов моделирования, однако привело к увеличению времени решения задачи. Поэтому кривая течения материала аппроксимировалась двумя прямыми линиями (билинейная аппроксимация) (рис. 2.10).

Задача решалась в плоско-деформированной постановке. Предполагалось, что все деформационные процессы в ОД происходят в плоскости продольного сечения, проходящей через ось вращения обрабатываемой детали (плоскости подачи). Плоско-деформированная постановка предполагает, что деформации возникают только в рассматриваемой плоскости, а тензор напряжений является условно объемным.

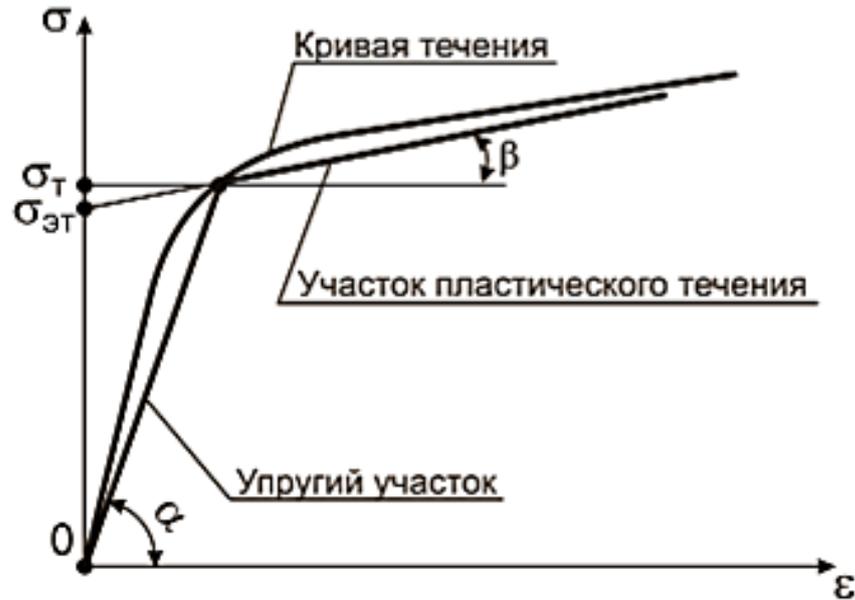


Рисунок 2.10 График билинейной аппроксимации кривой течения металла: α — угол наклона упругого участка; σ_T — предел текучести, $\sigma_{ЭТ}$ — экстраполированный предел текучести, соответствующий отрезку на оси напряжений, определяемому продолжением участка пластического течения; $T_{\text{мод}}$ — тангенциальный модуль, характеризующий угол наклона участка пластического течения β

В данной постановке напряженное состояние характеризуется 3-мя нормальными ($\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$) и одним касательным (σ_{xy}) компонентом, которые имеют ненулевые значения, касательная составляющая при этом действует в рассматриваемой плоскости:

$$[T_\sigma]_{xyz} = \begin{pmatrix} \sigma_x & \sigma_{xy} & 0 \\ \sigma_{xy} & \sigma_y & 0 \\ 0 & 0 & \frac{(\sigma_x + \sigma_y)}{2} \end{pmatrix}, \quad (2.1)$$

Напряжение σ_z перпендикулярно рассматриваемой плоскости и является полусуммой компонентов σ_x и σ_y . Остальные составляющие тензора напряжений имеют нулевые значения. Деформированное состояние характеризуется нормальными и касательными составляющими относительной деформации, которые действуют в рассматриваемой плоскости XY:

$$[T_\varepsilon]_{xyz} = \begin{pmatrix} \varepsilon_x & \varepsilon_{xy} & 0 \\ \varepsilon_{xy} & \varepsilon_y & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad (2.2)$$

В результате МКЭ-моделирования и последующих расчетов процесса ППД МР-роликом были получены:

- координаты узлов модели (x, y) , значения перемещений в этих узлах:

$$[U]_{xyz} = \begin{pmatrix} U_x & 0 & 0 \\ 0 & U_y & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}; \quad (2.3)$$

- распределения компонент тензора напряженного состояния, главных напряжений:

$$[T_\sigma]_{xyz} = \begin{pmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 \end{pmatrix}, \quad (2.4)$$

а также распределения компонент тензора относительных деформаций, возникающих в ОД при ППД МР-роликом.

В качестве обрабатываемой поверхности моделировался фрагмент плоскости главных деформаций цилиндрической детали (длина $L=100$ мм и высота $h=60$ мм) (рис.2.2).

Нижняя и боковые границы по осям x и y уфрагмента жестко закреплялись по обеим осям. Размеры возникающего при обработке очага деформации значительно меньше моделируемого фрагмента, поэтому возникающие при такой постановке краевые эффекты вносят в результаты моделирования весьма незначительную погрешность.

На материал поверхности детали воздействовал мультирадиусный ролик (МР-ролик), представляющий собой комбинацию 4-х последовательно расположенных относительно друг друга с некоторым смещением в радиальном направлении профильных радиусов: $R_{пр1} = 1$ мм и натягом $h_{д1} = 0,05$ мм; $R_{пр2} = 1$ мм и натягом $h_{д2} = 0,10$ мм; $R_{пр3} = 1$ мм и натягом $h_{д3} = 0,15$ мм; $R_{пр4} = 3$ мм и натягом $h_{д4} = 0,05$ мм. При этом, МР-ролик моделировался как абсолютно жесткое тело.

Изначально МР-ролик (а именно, профильный радиус $R_{пр1}$) находился на расстоянии от поверхности детали $0,20$ мм – иначе говоря, это исходный зазор (рис 2.11). Ролику придавалось смещение по оси x на величину подачи $S=0,1$ мм/об.

На первом и любом последующем нечетном шаге моделирования осуществлялось нагружение – перемещение индентора в направлении поверхности обрабатываемой детали – на $0,33$ мм.

На втором и любом последующем четном шаге моделирования осуществлялась разгрузка –отвод индентора и смещение влево на величину подачи (по X) на -0,1 мм (подача, $S=0,1$ мм/об.).

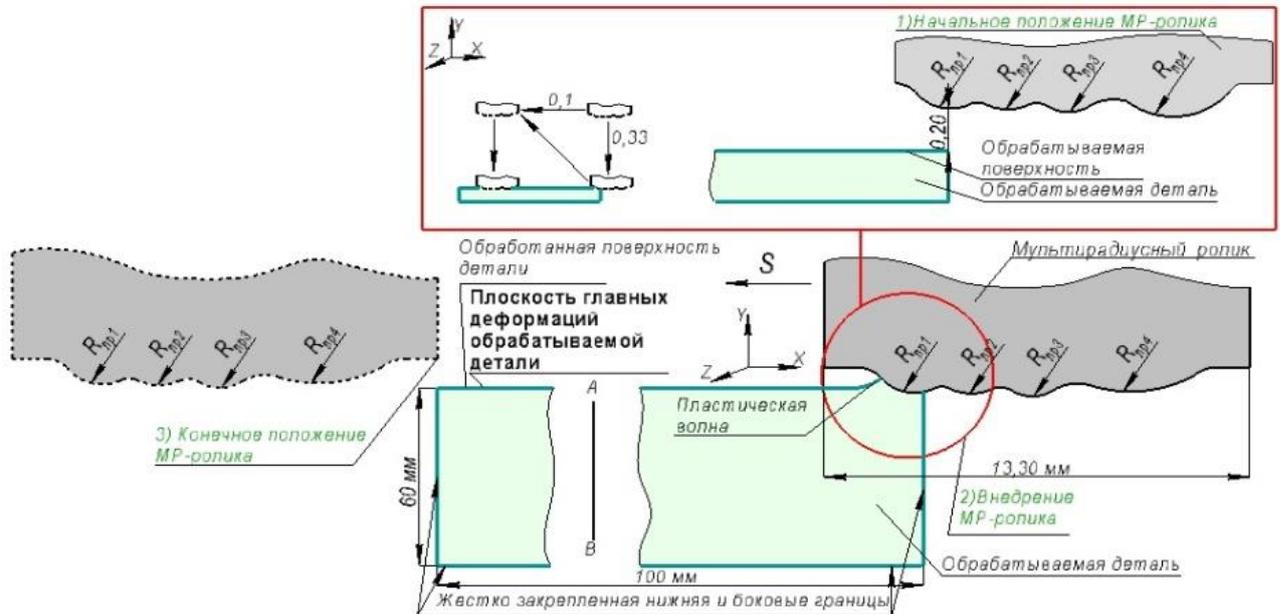


Рисунок 2.11 Схема постановки задачи для МКЭ-моделирования процесса ППД МР-роликом в плоско-деформированной постановке (390 шагов моделирования)

Всего было смоделировано 390 шагов – 195 шагов нагружения и 195 шагов разгрузки (табл. 2.6).

Таблица 2.6 Пошаговое перемещение МР-ролика

№ шага	Ход индентора	Тип шага	Смещение X, мм	Смещение Y, мм
1	Нагружение	Нечет	0	0,33
2	Разгрузка	Чет	-0,1	0
3	Нагружение	Нечет	-0,1	0,33
4	Разгрузка	Чет	-0,2	0
5	Нагружение	Нечет	-0,2	0,33
10	Разгрузка	Чет	-0,5	0
11	Нагружение	Нечет	-0,5	0,33
...				

Стоит отметить, что моделирование механики ППД МР-роликом проводилось при варьировании параметров: коэффициента трения; очага деформации; натягов МР-ролика; схемы перемещения индентора и др. В итоге был выбран коэффициент трения $\eta = 0,21$, что соответствует значению, использованному Смелянским В.М., Блюменштейном В.Ю. и Кречетовым А.А. [82-83, 268-269]. Это позволило сопоставлять полу-

ченные результаты с результатами этих авторов.

В процессе моделирования механики ППД МР-роликом рассматривались различные варианты постановки задачи.

Так, в одной из постановок аналогичным образом было смоделировано 232 шага нагружения (116 шагов – нагружения ПС, 116 шагов – разгрузки ПС) применялся МР-ролик с теми же профильными радиусами, что и в приведенной постановке задачи, описанной выше, но с иными натягами для каждого из инденторов (от 0,01 до 0,05 мм).

В другой постановке варьировалась величина перемещения МР-ролика в направлении поверхности обрабатываемой детали, при которой работают все четыре индентора и не происходит разрушение поверхности. Так, при внедрении ролика на большую глубину происходит «завал ролика».

При внедрении инструмента на величину 0,50 мм на 99-ом шаге нагружения пластическая волна «врезается» в боковую часть МР-ролика (рис. 2.12, а). На последнем шаге нагружения видно, насколько неправильно подобранное значение внедрения искажает деталь (рис. 2.12, б).

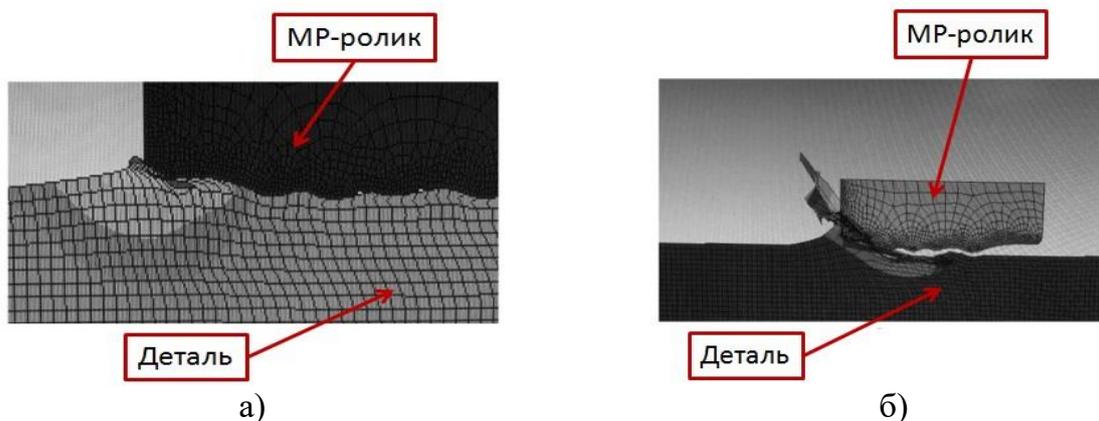


Рисунок 2.12 Фрагмент процесса обработки МР-роликом при неправильно подобранном значении внедрения ролика: а) после 99 шага нагружения; б) после 340 шага нагружения

Последующая проверка показала, что такая схема нагружения вызывает накопление предельных деформаций и разрушение поверхностного слоя детали уже в зоне контакта с инденторами, что не соответствовало реальной картине процесса ППД МР-роликом.

Всего было проверено более 5 различных схем нагружения, которые не дали удовлетворительных результатов. Таким образом, при постановке задачи моделирования механики ППД МР-роликом была принята описанная выше схема (рис. 2.11).

2.4 Анализ напряженно-деформированного состояния очага деформации и поверхностного слоя детали

Для получения данных о характере распределения напряжений, кинетике накопления деформации и исчерпания запаса пластичности, после решения задачи с целью пересчета полученных параметров напряженно-деформированного состояния (НДС) и расчета параметров механического состояния, определены координаты точек линий тока металла в ПС детали.

Для решения поставленной задачи применен алгоритм, разработанный Смелянским В.М. и реализованный в виде программного продукта Кречетовым А. А. и Блюменштейном В. Ю [268-269]. Согласно данному алгоритму, смещение материальной точки поверхностного слоя относительно индентора складывается из двух составляющих: смещения на величину подачи и смещения, вызываемого пластическим течением металла в ОД. Последнее рассчитывалось на основе смещений соседних узлов:

Алгоритм программы включает:

1. После решения модели в выделенном сечении AB для каждого шага моделирования фиксировались следующие значения: координаты узлов, составляющие вектора смещений узлов; компоненты тензора упругой, пластической и суммарной упруго-пластической деформации; компоненты тензора напряжений – напряжений под нагрузкой для нечетных шагов моделирования (шагов нагружения); промежуточных остаточных напряжений для четных шагов моделирования (шагов разгрузки) и итоговых остаточных напряжений для последнего четного шага моделирования, когда рассматриваемое сечение покинуло пространство очага деформации.
2. Перерасчет параметров механического состояния поверхностного слоя в точках линий тока в очаге деформации, полученных методом конечных элементов, из узлов конечно-элементной модели в точки линий тока по формулам из механики деформируемого твердого тела:

2.1 показатель схемы напряженного состояния:

$$\Pi = \frac{\sigma}{T} = \frac{1/3(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)}{1/\sqrt{6}\sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}}, \quad (2.5)$$

2.2 степень деформации сдвига:

$$\Lambda = \left\langle \frac{2}{\sqrt{3}} \int_0^t \sqrt{\frac{1}{2} [(\xi_x - \xi_y)^2 + (\xi_y - \xi_z)^2 + (\xi_z - \xi_x)^2]} + \frac{3}{4} (\eta_{xy}^2 + \eta_{yz}^2 + \eta_{zx}^2) \right\rangle dt, \quad (2.6)$$

2.3 тензор остаточных напряжений:

$$[T\sigma_{ост}]_{ij} = [T\sigma_{деф}]_{ij} + [T\sigma_{раз}]_{ij} + [T\sigma_t]_{ij}. \quad (2.7)$$

2.4 степень исчерпания запаса пластичности:

$$\Psi = \Psi_1 + \Psi_2 = \Psi_1 + (\Psi_{21} + \Psi_{22}) = n\varphi_0 \int_0^{\Lambda_k} \Lambda_i^{n-1} d\Lambda + \left(\int_0^{\Lambda_k} \frac{d\Lambda}{\Lambda_p} - \varphi_0 \int_0^{\Lambda_k} \Lambda_p^{n-1} d\Lambda \right), \quad (2.8)$$

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; $[T\sigma_{деф}]_{ij}$ – тензор напряжений нагрузки; $[T\sigma_{раз}]_{ij}$ – тензор напряжений разгрузки; $[T\sigma_t]_{ij}$ – тензор тепловых напряжений; Ψ_1 – составляющая, зависящая от напряжения текучести или от накопленной деформации; Ψ_2 – составляющая, зависящая от пластичности металла в условиях $\Pi = const$; 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 исчерпании запаса пластичности $\Psi = 1$.

Установлено, что локализация высокого гидростатического давления (среднего нормального напряжения, здесь и далее) наблюдается преимущественно между инденторами МР-ролика (рис.2.13). Наиболее интенсивно процесс деформирования проходит на последних шагах обработки (389-ом и 390-ом).

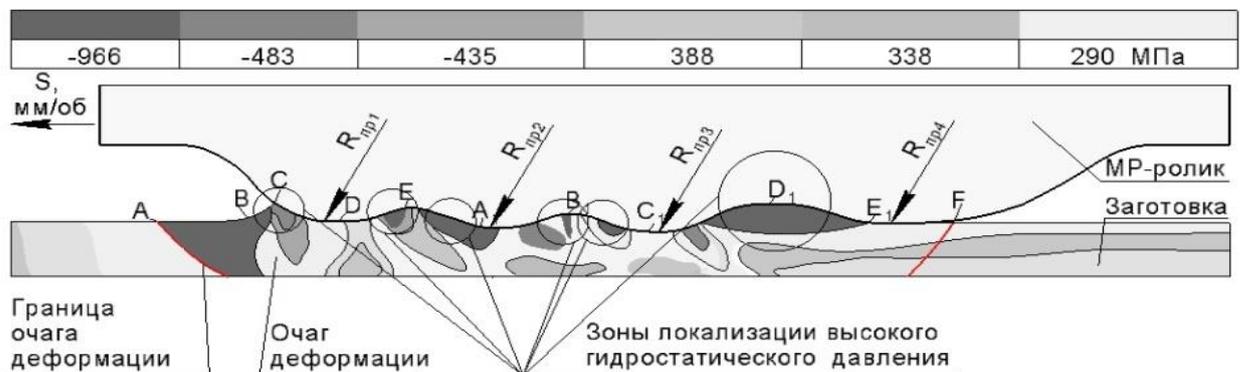


Рисунок 2.13 Схема распределения гидростатического давления в меридиональном сечении после 389-ого шага моделирования: A – точка начала пластической волны, B – точка начала подъема пластической волны, C – точка вершины пластической волны, D –

точка характеризующая заднюю часть пластической волны, $E, F, A1, B1, C1, D1, E1$ – точки характеризующие пластические волны от других инденторов МР-ролика

Рассмотрим подробнее значения компонентов тензора пластической деформации ($\epsilon_{\text{пл}x, y, xy}$) после 1-го (а-в) – шага нагружения, 2-го (г-е) – шага разгрузки, 389-го (ж-и) – шага нагружения, 390-го (к-м) – шага разгрузки (рис.2.14).

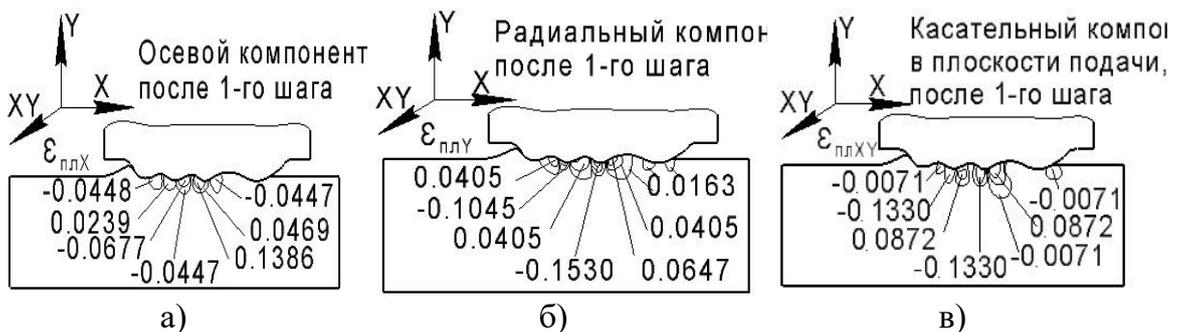
Установлено, что на 1-ом шаге нагружения, наибольшие значения ($-0,1530...-1,1045$) достигает радиальный компонент ($\epsilon_{\text{пл}y}$), преимущественно под третьим ДЭ с наибольшим натягом. Для осевого ($\epsilon_{\text{пл}x}$) и касательного ($\epsilon_{\text{пл}xy}$) компонентов характерны невысокие значения ($-0,1330...-0,0872$) (рис. 2.14, а-в).

На 2-ом шаге (разгрузка) наибольшие значения, так же достигает радиальный компонент $\epsilon_{\text{пл}y}$ ($-0,1529...-0,1287$), преимущественно под вторым и третьем ДЭ. Осевой компонент $\epsilon_{\text{пл}x}$ варьируется в пределах от $-0,0677$ до $0,1157$, касательный ($\epsilon_{\text{пл}xy}$) от $-0,1331$ до $0,1502$ (рис. 2.14, г-е).

Предпоследний, 389-ый шаг нагружения характеризуется большими значениями, преимущественно под тремя малыми ДЭ ($-0,9152...-0,5135$). Наибольшие значения достигает касательный ($\epsilon_{\text{пл}xy}$) компонент ($-0,9152...-0,7831$). Осевой компонент $\epsilon_{\text{пл}x}$ достигает средних значений ($-0,4250...0,1229$), а радиальный $\epsilon_{\text{пл}y}$ варьируется в пределах от $-0,1529$ до $0,0607$ (рис. 2.14, ж-и).

На 390-ом шаге (разгрузка), наибольшие значения достигает касательный компонент ($\epsilon_{\text{пл}xy}$) ($-0,9155...-0,7817$), преимущественно под тремя малыми радиусами ролика ($R_{\text{пр}1}, R_{\text{пр}2}, R_{\text{пр}3}$). Осевой компонент $\epsilon_{\text{пл}x}$ характеризуется невысокими значениями ($-0,216...0,448$). Радиальный компонент $\epsilon_{\text{пл}y}$ варьируется в пределах от $-0,9157$ до $0,1559$ (рис. 2.14).

В зоне образования пластической волны, также можно наблюдать большие значения компонента пластической деформации ($-0,7817...-0,7813$) (рис. 2.14 и, л).



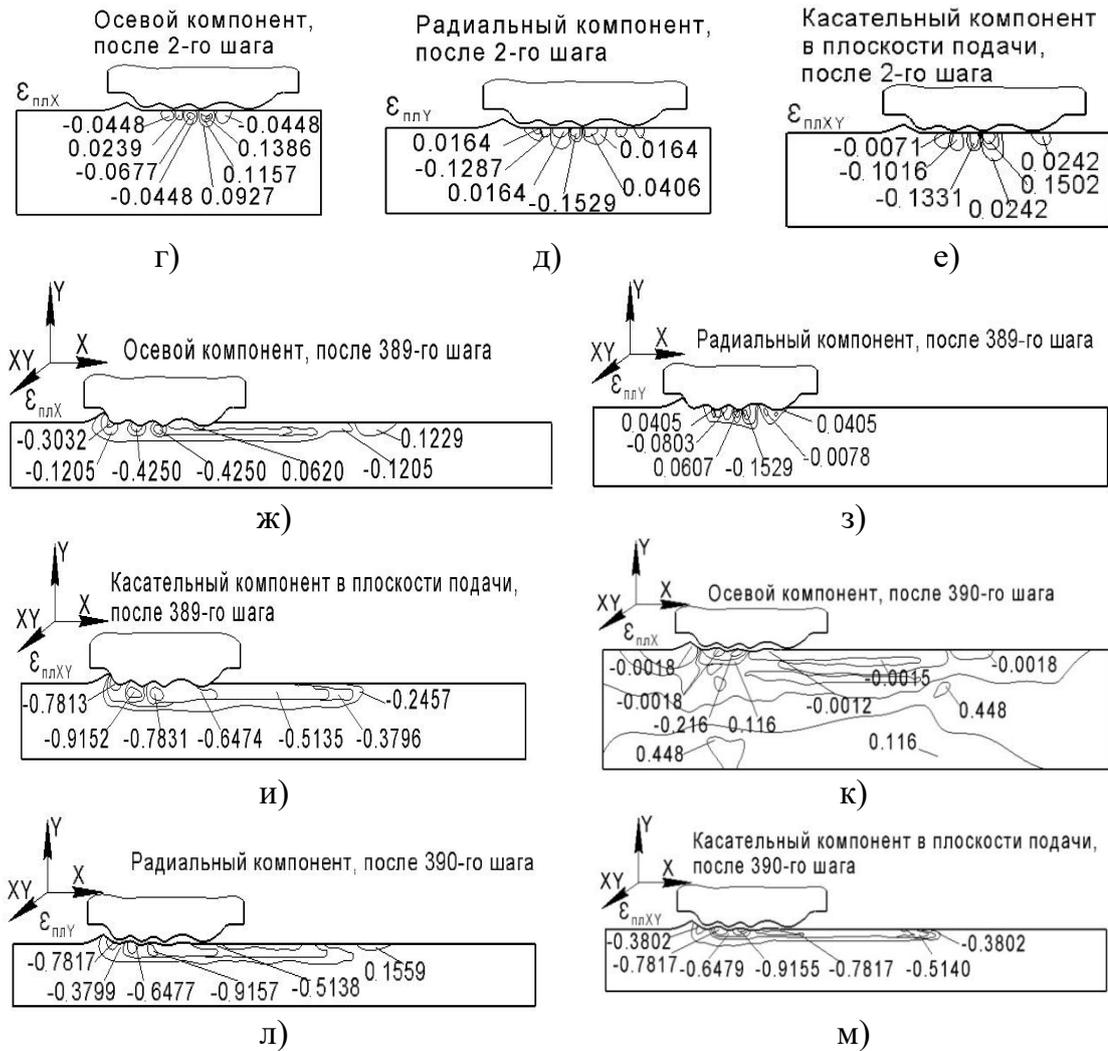


Рисунок 2.14 Распределение компонентов тензора пластической деформации ($\epsilon_{плx, y, xy}$) после 1-го (а-в) шага нагрузки, 2-го (г-е) шага разгрузки, 389-го (ж-и) шага нагрузки, 390-го (к-м) шага разгрузки

На рисунке 2.15 представлено распределение компонентов тензора полных (общих) деформаций ($\epsilon_{x, y, xy}$) после 1-го шага нагрузки (а-в), 2-го шага разгрузки (г-е), 389-го шага нагрузки (ж-и), 390-го шага разгрузки.

Наибольшие значения ($-0,9164 \dots -0,7875$) достигает касательный компонент ϵ_{xy} на предпоследнем 389-ом шаге нагружения, преимущественно в области образования металлического валика и под передними и задними частями малых деформирующих элементов ($R_{пр1}, R_{пр2}, R_{пр3}$) (рис. 2.15, и).

Осевой компонент ϵ_x на 1-ом, 2-ом шаге нагружения и разгрузки характеризуется небольшими значениями ($-0,0683 \dots -0,0462$). Радиальный $\epsilon_{плy}$ и касательный $\epsilon_{плxy}$ на 1-ом, 2-ом шаге, также характеризуются невысокими значениями ($-0,1526 \dots -0,1343$), наиболее интенсивно процесс обработки протекает под вторым и третьим ДЭ

(рис. 2.15, в, б, д, е). Стоит отметить, что отрицательные значения чередуются с положительными.

Анализ показывает практически одинаковый характер распределения как на 389-ом, так и на 390-ом шагах моделирования, что позволяет сделать вывод о том, что большая часть общей деформации сдвига является результатом не последнего шага, а всего процесса нагружения.

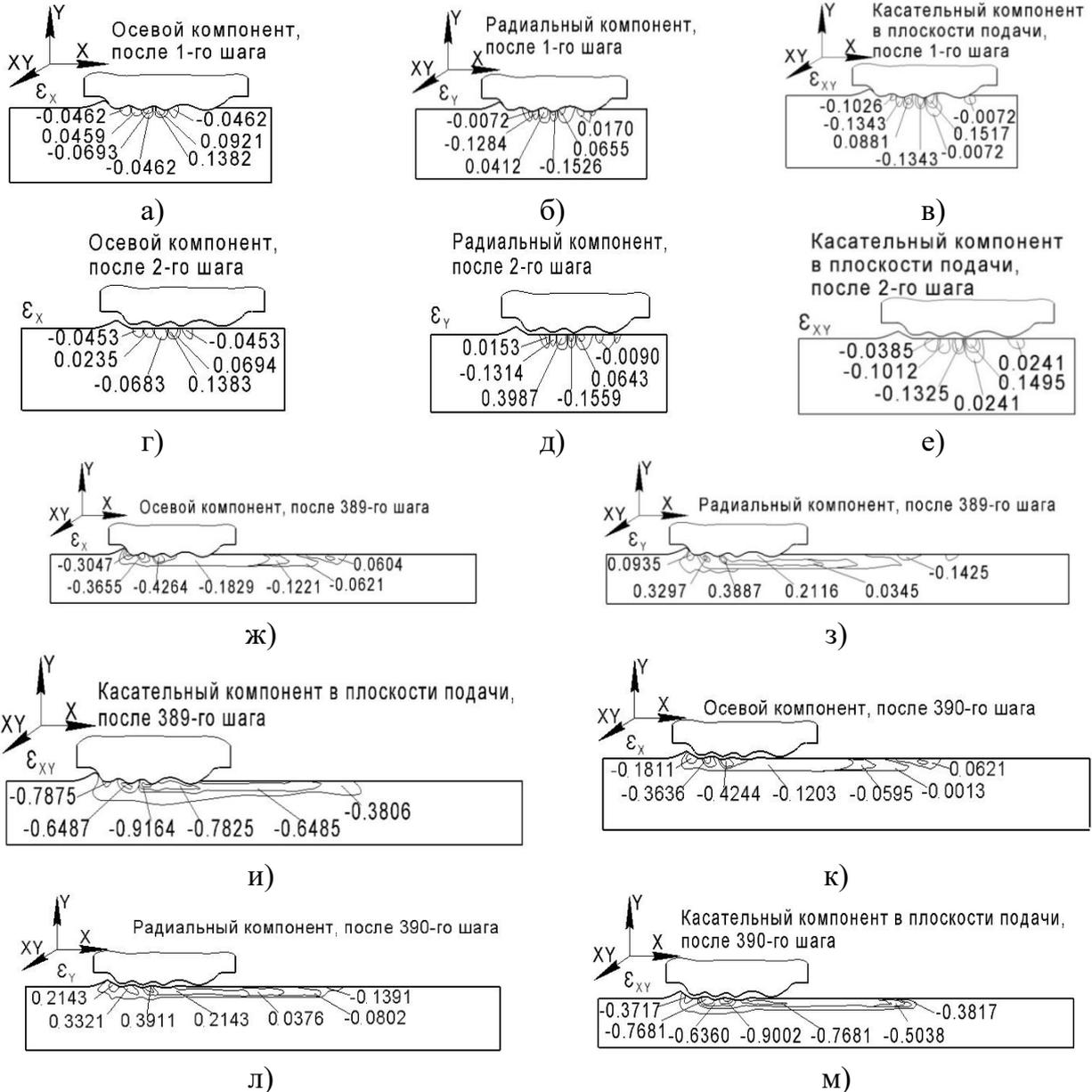


Рисунок 2.15 Распределение компонентов тензора полных деформаций ($\epsilon_{x, y, xy}$) после 1-го (а-в) шага нагрузки, 2-го (г-е) шага разгрузки, 389-го (ж-и) шага нагрузки, 390-го (к-м) шага разгрузки

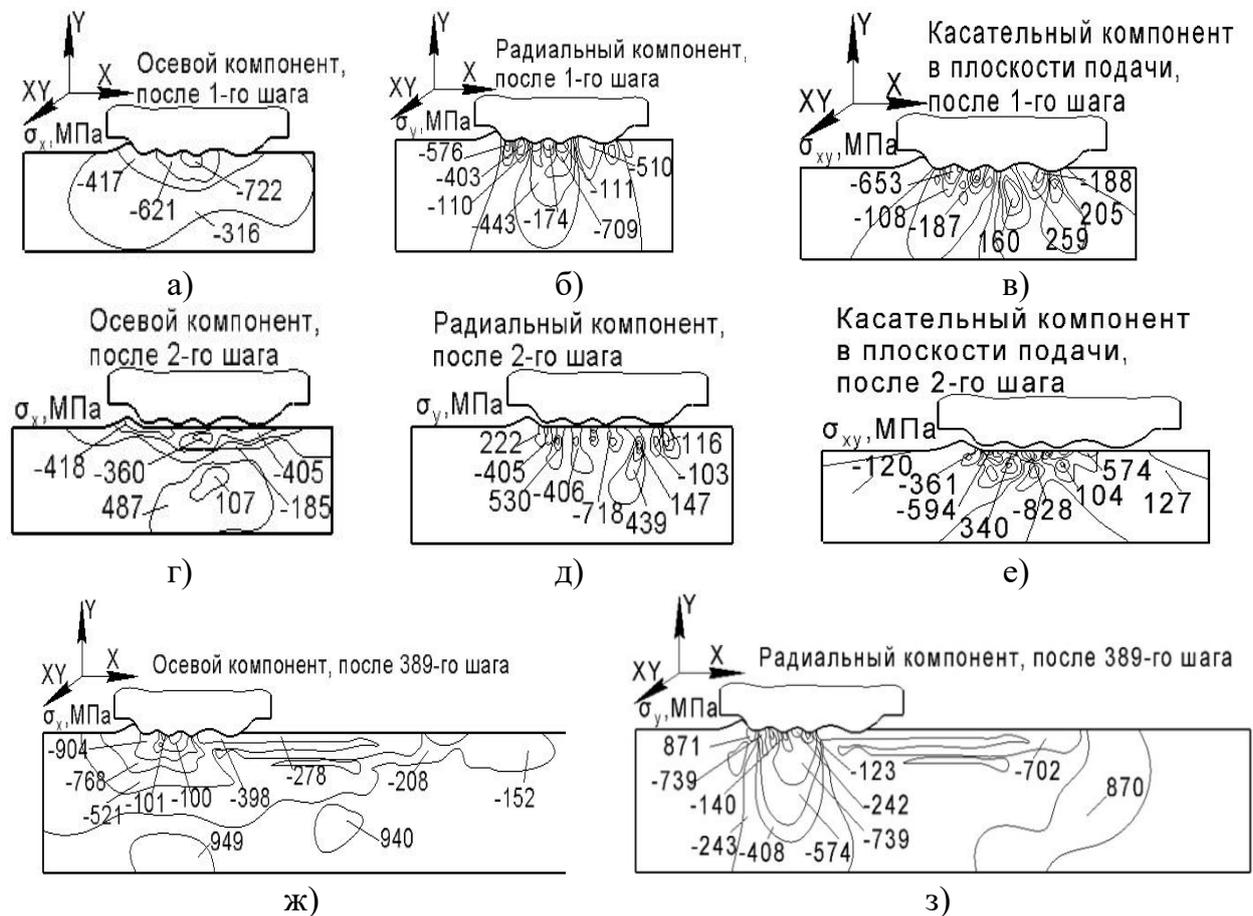
Рассмотрим подробнее распределение компонентов тензора напряжений ($\sigma_{x, y, xy}$, МПа) после 1-го (а-в), 2-го (г-е), 389-го (ж-и), 390-го (к-м) шага (рис.2.16).

Наибольшие значения сжимающих значений (-904...-739 МПа) достигают осевой σ_x и радиальный σ_y компоненты на 389-ом шаге нагрузки (рис. 2.16 ж, з), наиболее интенсивное напряженно-деформированное состояние можно наблюдать между инденторами МР-ролика.

Касательный компонент σ_{xy} характеризуется средними значениями сжимающих напряжений (-828...-764 МПа). Картина распределения касательных напряжений по мере продвижения вдоль очага деформации представлена несколькими противоположными по знаку зонами. Осевой компонент σ_x на 1-ом, 2-ом шаге нагружения и разгрузки также характеризуется средними значениями сжимающих напряжений, которые варьируются в пределах от -722 до -418 МПа (рис. 2.16 а, г).

Высокими значениями сжимающих напряжений (-718...-576 МПа) характеризуется радиальный σ_y компонент на 1-ом и 2-ом шаге нагружения и разгрузки. Касательный компонент σ_{xy} на 1-ом и 2-ом шаге изменяется в пределах от -828 до -108 МПа, при этом наибольшие значения можно наблюдать под третьим и вторым ДЭ (рис. 2.16 в, е).

Анализируя полученные результаты, можно сказать, что наибольший перепад всех компонент напряжений наблюдается в зонах перекрытия очагов деформации, между инденторами МР-ролика.



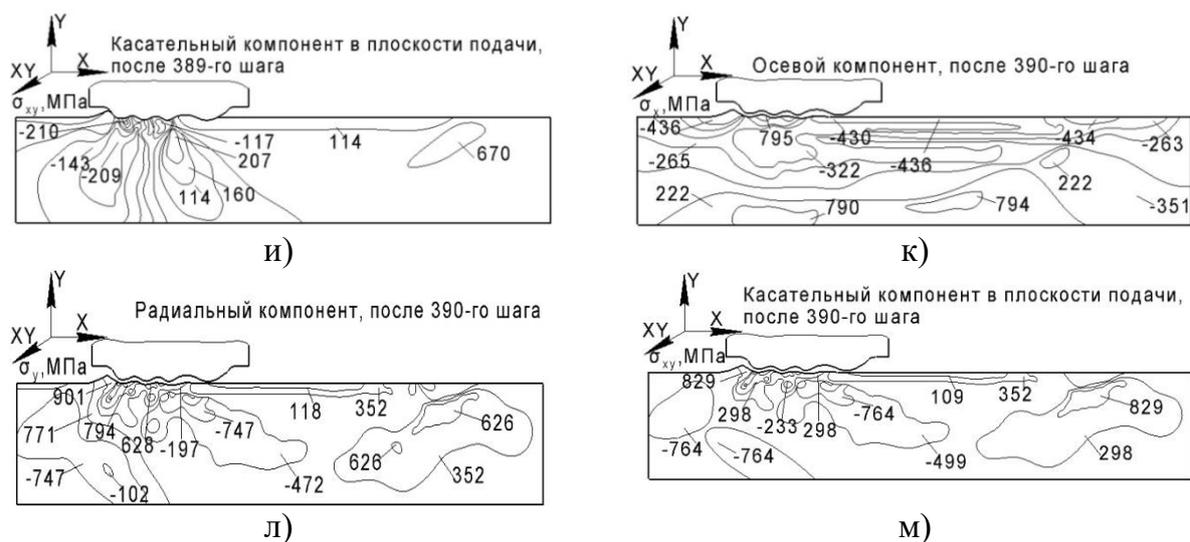


Рисунок 2.16 Распределение компонентов тензора напряжений ($\sigma_x, \sigma_y, \sigma_{xy}$, МПа) после 1-го (а-в) шага нагрузки, 2-го (г-е) шага разгрузки, 389-го (ж-и) шага нагрузки, 390-го (к-м) шага разгрузки

Полученные данные после МКЭ-моделирования процесса, коррелируют с результатами исследования [184], в котором смоделирован процесс ППД шариковым инструментом ($R_{pr} = 5$ мм) по схеме многократного нагружения-разгрузки металла детали, максимально учитывающей феноменологию процесса ППД. Получены распределения параметров напряженно-деформированного состояния, а так же параметры механического состояния поверхностного слоя и остаточные напряжения, применительно к стали 45 ГОСТ 105-88 (табл. 2.7).

Таблица 2.7 Сопоставление минимальных и максимальных значений компонентов тензора напряжений ($\sigma_x, \sigma_y, \sigma_{xy}$), после обработки шариковым инструментом ($R_{pr} = 5$ мм, 150 шагов нагружения, 150 шагов разгрузки), после обработки МР-роликом (195 шагов нагружения, 195 шагов разгрузки)

Тип инструмента	Шаг моделирования		Шаг			
			299		300	
	Компонент		Min	Max	Min	Max
Шариковый инструмент ($R_{pr} = 5$ мм)	Осевой	σ_x , МПа	-115	+406	-684	484
	Радиальный	σ_y , МПа	-192	+101	-172	+152
	Касательный в плоскости подачи	σ_{xy} , МПа	-304	+463	-183	+196
Тип инструмента	Шаг моделирования		Шаг			
			389		390	
	Компонент		Min	Max	Min	Max
Мультирадиусный	Осевой	σ_x , МПа	-904	+760	-739	+794

ролик						
	Радиальный	σ_y , МПа	-865	+479	-840	+245
	Касательный в плоскости подачи	σ_{xy} , МПа	-828	+224	-756	+540

Анализируя полученные данные можно сказать, что и в случае обработки шариковым инструментом, и в случае обработки МР-роликом большая часть сжимающих напряжений наблюдается в зоне очага деформации: при обработке шариком локализация сжимающих напряжений преимущественна под индентором; при обработке МР-роликом наибольшие сжимающие напряжения локализуются между деформирующими инденторами, в так называемых «зонах перекрытия» очагов деформации. Также стоит отметить, что обработка МР-роликом приводит к большим диапазонам варьирования компонентов тензора напряжений, чем обработка шариковым инструментом (минимум в 3 раза), что позволяет убедиться в том, что процесс обработки сложнопрофильным инструментом приводит к интенсификации напряженно-деформированного состояния в ПС детали.

2.5 Расчет и анализ накопления деформаций и исчерпания запаса пластичности металла

По итогам МКЭ-моделирования установлена картина формирования напряженно-деформированного состояния (НДС) в зоне очага деформации (ОД) и упрочненном поверхностном слое детали.

На рис. 2.17 представлены профили очагов деформации, полученных в при МКЭ-моделировании и в процессе проведения экспериментов. Установлено, что с достоверностью свыше 85% теоретический профиль совпадает с экспериментальным (подраздел 4.2); это говорит о корректности постановки МКЭ-задачи и полученной модели процесса. На рис. 2.18 показано, что в зоне зарождения пластической волны компоненты напряженно-деформированного состояния уже имеют ненулевые значения, что свидетельствует о том, что область напряженно-деформированного состояния металла имеет значительно большие размеры, чем зона пластического течения металла.

Кроме того, верхние области очага деформации находятся в условиях сжатия (рис. 2.17). Компоненты тензора напряжений (σ_x , σ_y , σ_z , σ_{xy}) изменяются в соответствии с профилем деформирующих элементов МР-ролика (рис. 2.18). Компонент σ_x в зоне передней

внеконтактной поверхности перед первым деформирующим элементом ($R_{пр1} = 1$ мм) вначале снижается до -205 МПа, затем в точке вершины профиля первого ДЭ увеличивается до 100...120 МПа. Далее компонент σ_x в зоне задней контактной поверхности первого деформирующего элемента снижается до -195 МПа. В переходной зоне между первым ($R_{пр1}$) и вторым ($R_{пр2}$) деформирующими элементами компонент σ_x изменяется в пределах от -194 до -198 МПа.

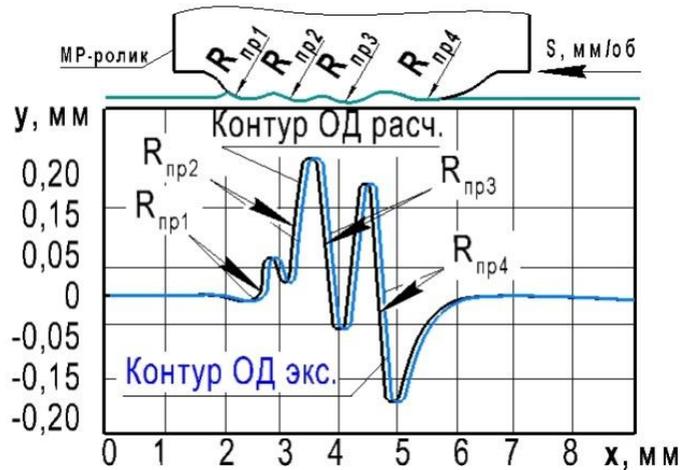


Рисунок 2.17 Схема профиля очага деформации при МКЭ- моделировании процесса ППД МР-роликом

В передней контактной части второго деформирующего элемента ($R_{пр2} = 1$ мм) компонент σ_x имеет положительные значения (199 МПа), также как и в точке вершины профиля второго ДЭ (205 МПа). В задней внеконтактной поверхности второго деформирующего элемента, компонент σ_x изменяется в пределах от -204 до -193 МПа. В свободной полости между вторым ($R_{пр2}$) и третьим ($R_{пр3}$) деформирующими элементами компонент σ_x также имеет отрицательные значения (-199 МПа) (рис. 2.18).

В зоне третьего ($R_{пр3} = 1$ мм) деформирующего элемента (с наибольшим натягом), компонент σ_x изменяется в пределах от -251 до 100 МПа. В точке вершины профиля третьего ДЭ компонент σ_x находится преимущественно в условиях растягивающих напряжений и изменяется в пределах от 104 до 199 МПа. В переходной зоне между третьим ($R_{пр3}$) и четвертым ($R_{пр4}$) деформирующими элементами компонент σ_x изменяется в пределах от -251 до -198 МПа. В зоне нагружения наибольшим, четвертым деформирующим элементом ($R_{пр4} = 3$ мм) компонент σ_x изменяется в пределах от 100 до 189 МПа. В точке вершины четвертого ДЭ значение компонента достигает (191 МПа). В

задней внеконтактной поверхности четвертого деформирующего элемента, компонент σ_x изменяется в пределах от -105 до -100 МПа.

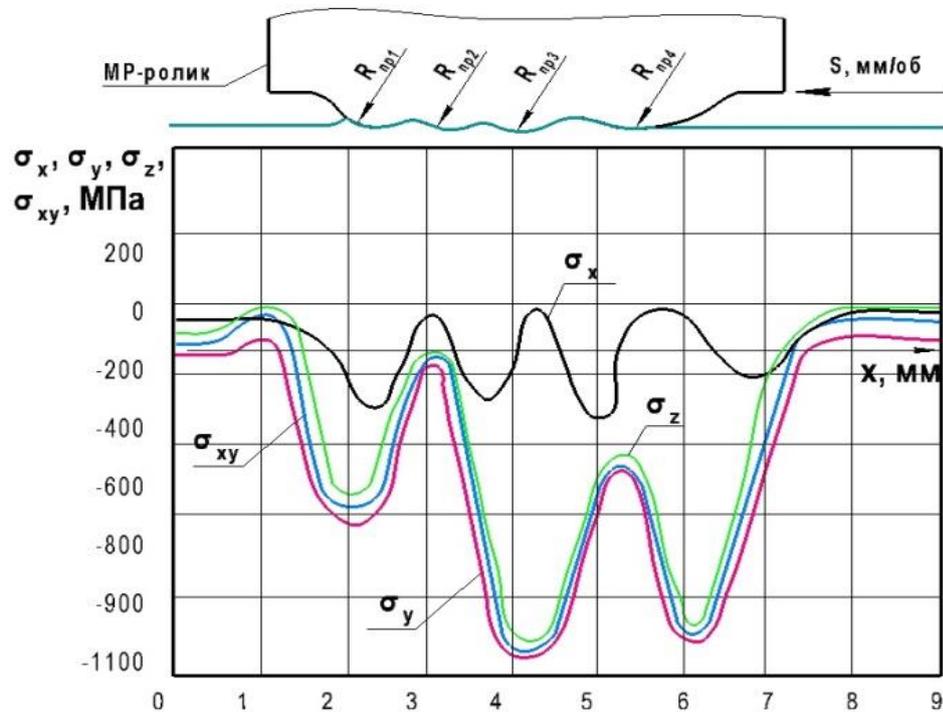


Рисунок 2.18 График распределения компонент тензора напряжений [$T\sigma$]

Компонент σ_y (рис. 2.18) в зоне передней внеконтактной поверхности перед первым деформирующим элементом ($R_{пр1} = 1$ мм) вначале возрастает до 105 МПа, затем в точке вершины профиля первого ДЭ увеличивается до 200 МПа; затем компонент σ_y в зоне задней контактной поверхности $R_{пр1}$ снижается до -604 МПа. В свободной полости между первым ($R_{пр1}$) и вторым ($R_{пр2}$) деформирующими элементами компонент σ_y варьируется в пределах от -604 до -514 МПа. В передней части второго деформирующего элемента ($R_{пр2} = 1$ мм) компонент σ_y изменяется в пределах от -487 до -226 МПа, в точке вершины профиля второго ДЭ (-106 МПа). В задней контактной поверхности второго деформирующего элемента, компонент σ_y варьируется в пределах от -697 до -264 МПа. В свободной полости между вторым ($R_{пр2}$) и третьим ($R_{пр3}$) деформирующими элементами компонент σ_y также имеет отрицательные значения (-846 МПа). В передней контактной поверхности третьего ($R_{пр3} = 1$ мм) деформирующего элемента (с наибольшим натягом), компонент σ_y изменяется в пределах от -514 до -240 МПа. В точке вершины профиля третьего ДЭ, компонент σ_y достигает -106 МПа. В свободной полости меж-

ду третьим ($R_{\text{пр}3}$) и четвертым ($R_{\text{пр}4}$) деформирующими элементами компонент σ_y изменяется в пределах от -443 до -956 МПа. В передней части четвертого деформирующего элемента ($R_{\text{пр}4} = 3$ мм) компонент σ_y изменяется в пределах от -540 до -950 МПа. В точке вершины профиля четвертого ДЭ, значение компонента достигает (-550 МПа). В задней контактной поверхности четвертого деформирующего элемента, компонент σ_y варьируется в пределах от - 540 до - 847 МПа. Аналогичным образом изменяются и компоненты σ_z , σ_{xy} , разница между ними и σ_y составляет не более 1-1,5 %.

Стоит отметить, что для осевого компонента (σ_x) характерна смена знака деформации, но наибольшие сжимающие напряжения (- 956... - 918 МПа) достигает радиальный (σ_y) и касательный (σ_{xy}) компоненты преимущественно под вторым ($R_{\text{пр}2}$), третьим ($R_{\text{пр}3}$) деформирующим элементом МР-ролика и между инденторами (свободная полость МР-ролика). По мере продвижения по очагу деформации указанные напряжения волнообразно снижаются до -100... -110 МПа. Волнообразный характер изменения напряжений, на небольших участках (длиной 0,2... 1 мм) в ОД обусловлен многократностью приложения деформирующего усилия: число волн в картине напряженного состояния соответствует числу ДЭ мультирадиусного ролика.

На рисунке 2.19 (а) представлено распределение интенсивности касательных напряжений T и среднего нормального напряжения σ_n . Установлено, что данные параметры механического состояния ПС изменяются волнообразно. Интенсивность касательных напряжений T достигает максимальных значений (200...230 МПа) в зоне между 2-ым и 3-им, а также в зоне между 3-им и 4-им деформирующими элементами. Перепады значений (150...215 МПа) интенсивности касательных напряжений наблюдаются в зонах передних и задних контактных поверхностей ДЭ. К точке выхода из очага деформации, параметр T остается на уровне 200...210 МПа.

Среднее нормальное напряжение σ_n (рис. 2.19, а) достигает своих максимальных значений (-890...-1000 МПа) в точках вершин профилей от второго и третьего ДЭ. Кроме того, σ_n на протяжении всего очага деформации имеет отрицательные значения. Данное обстоятельство говорит о том, что большая часть металла очага деформации находится в условиях всестороннего сжатия.

На рисунке 2.19 (б) представлено распределение компонент тензора скоростей деформации. Из рисунка видно, что скорости деформации так же изменяются синхронно и волнообразно, неоднократно меняя величины и знак (с положительного на отрица-

тельный и наоборот). Наибольшие значения (-40) достигает осевой компонент ξ_x , расположенный в районе задней контактной поверхности 2-го ДЭ. Касательный компонент ξ_{xy} варьируется в пределах от -10 до 38, а радиальный от -20 до 15 (рис. 2.19, б). Различные по величине локальные экстремумы мгновенных значений компонент скоростей деформации наблюдаются в районе передних и задних контактных поверхностях всех ДЭ. В зоне выхода из ОД все компоненты принимают близкие к нулю значения. Ранее, анализ показал, что в результате обработки МР-роликом в очаге деформации образуются 3 участка квазимонотонной деформации.

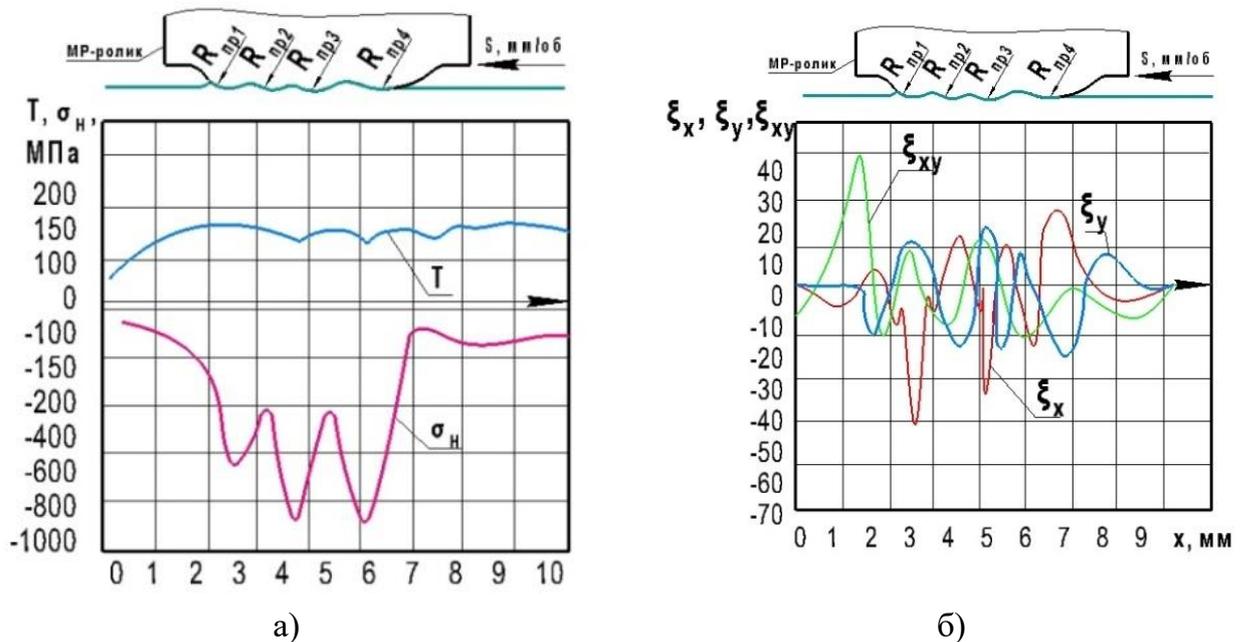


Рисунок 2.19 Графики зависимостей: а) Распределение интенсивности касательных напряжений T и среднего нормального напряжения σ_n ; б) Распределение компонент тензора скоростей деформации

Участки «перекрывают» друг друга, образуя зоны перекрытия очагов деформации (зоны перекрытия очагов деформации: ОД₁ и ОД₂; ОД₂ и ОД₃; ОД₃ и ОД₄) в которых нарушается монотонность деформации, сопровождающаяся сменой знака с положительного на отрицательный, что в свою очередь свидетельствует о частичном восстановлении запаса пластичности металла (рис. 2.19, б).

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. 2.20, а).

Почти на протяжении всего ОД показатель схемы напряженного состояния отрицателен, достигая значений $\Pi = -0,696$ в районе вершин 2-го и 3-его ДЭ, что свиде-

тельствует о интенсивности процесса деформации. 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. 2.20, а).

На рисунке 2.20 (б) представлено распределение накопленных значений степени деформации сдвига Λ и степени исчерпания запаса пластичности Ψ . Установлено, что при обработке МР-роликом волнообразно накапливаются существенные значения степени деформации сдвига $\Lambda \approx 7$, при этом, вследствие благоприятной схемы НДС, степень исчерпания запаса пластичности не превышает значений $\Psi \approx 0,68$ (рис. 2.20, б).

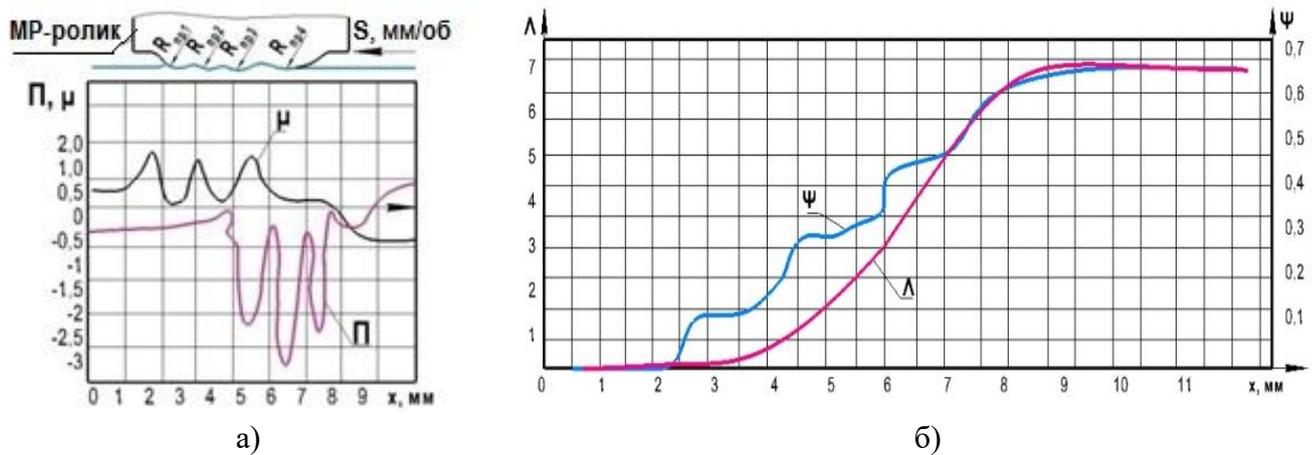


Рисунок 2.20. Графики зависимостей: а) Распределение показателя схемы напряженного состояния Π и параметра Лоде μ ; б) Распределение накопленных значений степени деформации сдвига Λ и степени исчерпания запаса пластичности Ψ ($\Psi = 1$ – полное исчерпание запаса пластичности)

Анализируя полученные результаты с данными ранее проведенных исследований [56] можно сказать, что при обработке ППД торвым роликом:

- накопление предельной деформации $\Lambda \approx 1,24$ привело бы к предельному состоянию металла и последующему разрушению ПС при $\Psi = 1$, профильном радиусе $R_{пр} = 1$ мм и действительном натяге $h_d = 0,03$ мм;
- накопление предельной деформации $\Lambda \approx 1,24$ привело бы к аналогичному предельному состоянию металла и разрушению, при $\Psi = 1$, профильном радиусе $R_{пр} = 3$ мм и натяге $h_d = 0,05$ мм;
- действительный натяг $h_d = 0,15$ мм при профильном радиусе $R_{пр} = 1$ мм недопустим, потому, что внедрение деформирующего инструмента в течение нескольких оборотов детали приводит к нестационарному очагу деформации, следствием которого яв-

ляется критический рост пластической волны перед деформирующим инструментом и последующее разрушение в зоне ее вершины;

— обработка ППД с указанными натягами и профильными радиусами последовательно вторым, третьим и четвертым рабочими ходами приводит к накоплению предельных деформаций и полному исчерпанию запаса пластичности металла уже после первого рабочего хода.

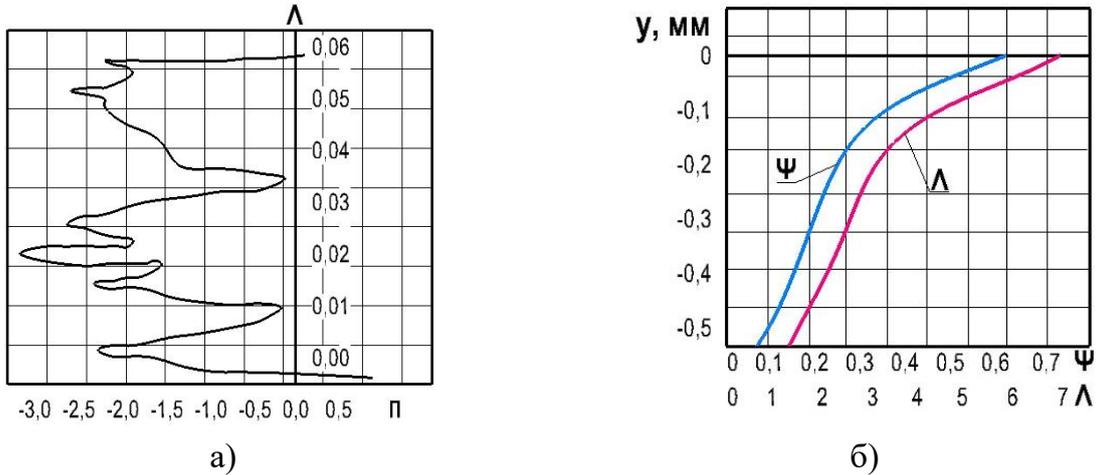


Рисунок 2.21 Графики зависимостей: а) Зависимость накопленной степени деформации Λ от показателя схемы напряженного состояния Π (программа нагружения); б) Накопленные значения Λ и Ψ по глубине поверхностного слоя

На рисунке 2.21 представлена зависимость накопленной степени деформации Λ от показателя схемы напряженного состояния Π (программа нагружения). Установлено, что при обработке МР-роликом имеется больший, чем при обычных схемах ППД, диапазон управления программой нагружения, а сама программа нагружения имеет весьма оригинальную траекторию, обнаруживающую вертикальные участки, свидетельствующие о возможности измельчения структуры металла в поверхностном слое. Результаты моделирования также показали равномерное накопление Λ и Ψ по глубине ПС (рис. 2.21, б).

2.6 Выводы по главе 2

1. Разработана развитая структурная модель процесса, в качестве основной функции которой предложена «Интенсификация напряженно-деформированного состояния в очаге деформации при ППД МР-роликом». Структурная модель с последующими декомпозициями позволила систематизировать и структурировать большой объем информации, в результате чего были сформированы комплекс исследований по разработке теоретиче-

ских положений процесса ППД мультирадиусным инструментом и предложения по проектированию технологического процесса упрочняющей обработки.

2. Впервые разработана феноменологическая модель процесса, позволившая показать взаимосвязи между предложенной конструкцией МР-ролика и особенностями пластического течения металла в очаге деформации, в том числе, движения условной частицы металла в очаге деформации. Модель позволила поэтапно описать процесс нагружения поверхностного слоя детали инденторами МР-ролика, физико-механические явления, происходящие на каждом этапе нагружения и в результате выявить три зоны перекрытия очагов деформации с высоким гидростатическим давлением.

3. Анализ феноменологической модели позволил обоснованно сравнить пластическое течение металла при ППД МР-роликом с процессом обработки металлов давлением в открытом штампе. Автором установлено, что рабочие полости между инденторами выполняют функции, аналогичную функциям рабочих полостей ручьев штампа при объемной штамповке, что содействует созданию зон очага деформации с высоким гидростатическим давлением. В тоже время деформирующие элементы с профильными радиусами ($R_{пр1}$, $R_{пр2}$, $R_{пр3}$ и $R_{пр4}$) будут выполнять функции, аналогичные функциям заусенечных канавок при штамповке в открытых штампах, и являются регуляторами давления.

4. Выявлены закономерности пластического течения металла, обусловленные последовательностью работы инденторов МР-ролика. Согласно модели и результатам последующих теоретических и экспериментальных исследований в начальный период процесса происходит интенсивное, обусловленное большими натягами инденторов (от 0,05 до 0,15 мм), пластическое течение металла за предыдущим и впереди следующего за ним индентора. За счет этого происходит заполнение металлом рабочей полости между инденторами ввиду меньшего сопротивления истечению потока металла в сравнении с истечением в глубину ПС и в направлении подачи. Металл в этой полости аналогичен металлу в рабочей полости ручья штампа; в этот момент за счет поджатия металлом уже заполненной рабочей полости происходит интенсивное течение металла в глубину поверхностного слоя и в направлении подачи; в совокупности это увеличивает размеры очага деформации. Заполненная металлом рабочая полость между инденторами приводит к большей интенсивности пластического течения за счет создания условий, близких к всестороннему сжатию. Это говорит о возникновении в этой зоне высокого гидроста-

тического давления и последующему интенсивному пластическому течению металла без его разрушения.

5. Впервые проведено МКЭ-моделирование процесса ППД МР-роликом в плоскодеформированной постановке с использованием программного продукта Ansys. Получены высокие значения (от -756 до -910 МПа) осевых и касательных компонентов тензора напряжений преимущественно в рабочих полостях МР-ролика. Касательные компоненты тензора полных деформаций (ϵ_{xy}) и пластических деформаций ($\epsilon_{плху}$) достигли наибольших значений (-0,916...-0,787) на последних шагах нагружения поверхностного слоя, также преимущественно в рабочих полостях МР-ролика.

6. Анализ результатов МКЭ-моделирования показал, что профиль очага деформации с достоверностью свыше 85% совпадает с экспериментальным профилем, полученным методом слепков после быстрого отвода / отстрела МР-ролика от поверхности детали, что свидетельствует о корректности постановки задачи МКЭ-моделирования. Полученная МКЭ-модель процесса позволила выявить картину сложного напряженно-деформированного состояния и установить, что предложенная конструкция деформирующего инструмента – МР-ролика позволяет реализовывать схемы упрочняющей обработки с интенсивным напряженно-деформированным состоянием. Интенсификация процесса обусловлена высоким гидростатическим давлением и большим количеством участков квазимонотонной деформации в зонах перекрытия очагов деформации, что несмотря на большие натяги, позволяет выполнять эффективную обработку без разрушения поверхностного слоя.

7. Впервые с использованием аппарата механики технологического наследования в очаге деформации вдоль линий тока и по глубине упрочненного поверхностного слоя последовательно рассчитаны смещения, скорости смещений, скорости деформаций, интенсивности скоростей деформаций, степени деформации сдвига Λ и степени исчерпания запаса пластичности металла Ψ . Установлено, что при обработке МР-роликом накапливаются существенные значения степени деформации сдвига, достигающие значений равных $\Lambda \approx 7$. При этом вследствие благоприятной схемы НДС, степень исчерпания запаса пластичности не превышает значений $\Psi \approx 0,68$. Показано, что накопление Λ и Ψ происходило при применении больших натягов на инденторы МР-ролика (от 0,10 до 0,15 мм), что недопустимо при традиционных схемах ППД; тем не менее разрушение металла поверхностного слоя отсутствовало.

3. МЕТОДИКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

3.1 Программа экспериментальных исследований

С целью подтверждения ранее выдвинутой научной гипотезы и установления влияния режимов обработки ППД МР-роликом на качество поверхностного слоя были разработаны программа и методики экспериментальных исследований.

Программа экспериментальных исследований включала в себя (рис. 3.1):

- 1) выбор материалов образцов;
- 2) пробоподготовку цилиндрических и кольцевых образцов;
- 3) контроль геометрических параметров образцов;
- 4) проведение локального эксперимента по формированию очагов деформации и выявления начальных и граничных условий для решения задач механики ППД МР-роликом;
- 5) обработку поверхностным пластическим деформированием МР-роликом;
- 6) измерение и контроль геометрических параметров, волнистости и шероховатости упрочненных образцов;
- 7) пробоподготовку металлографических шлифов, включающую: вырезку из обработанной части образцов плоскопараллельного участка; запрессовку в эпоксидную смолу; шлифовально-полировальную обработку; травление исследуемой поверхности;
- 8) определение параметров упрочнения: микротвердости, степени и глубины упрочнения;
- 9) проведение физических исследований методами оптической микроскопии (ОМ), атомно-силовой микроскопии (АСМ) и рентгеноструктурного анализа (РСА).
- 10) статистическую обработку полученных данных.

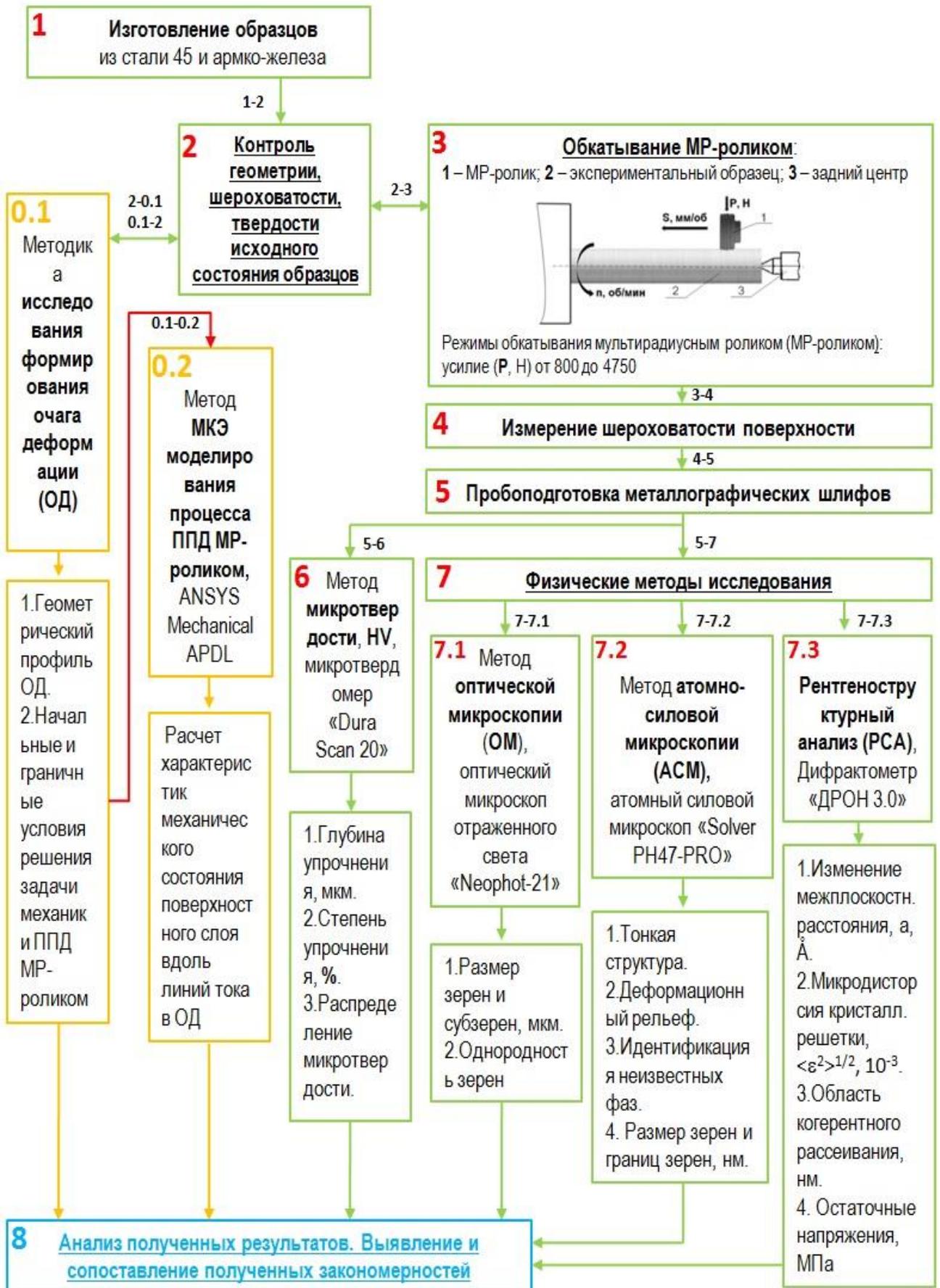


Рисунок 3.1 Схема проведения исследований

3.2 Обоснование выбора материалов образцов, методика их подготовки и выбор технологической оснастки

3.2.1 Выбор материалов образцов

При проведении экспериментальных исследований использовались цилиндрические и кольцевые типы образцов.

В первом блоке испытаний изготавливались цилиндрические образцы (рис. 3.2) из армко-железа и стали 45, а также кольцевые образцы (рис.3.3) из стали 45 ГОСТ 1050-88 одной поставки.

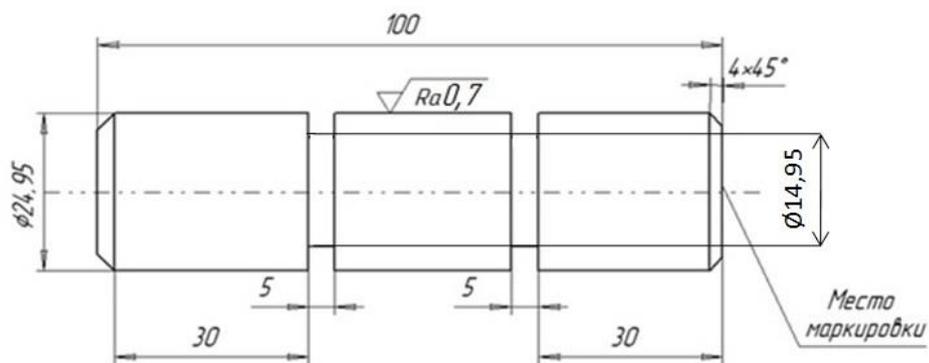


Рисунок 3.2 Схема рабочей части цилиндрического образца

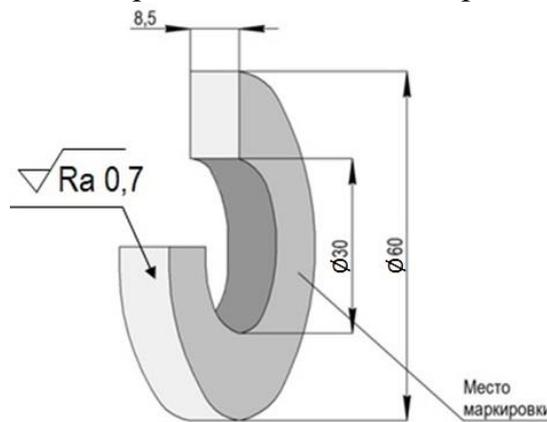


Рисунок 3.3 Схема кольцевого образца

Химический состав армко-железа и стали 45 представлены в таблице 3.1, физико-механические свойства материалов – в таблице 3.2.

Таблица 3.1 Химический состав армко-железа и стали 45 ГОСТ 1050-88

Сплав	C %	Mn %	Si %	S %	P %	Ni %	Cr %	Mo %
Армко-железо	0,004	0,04	0,05	0,005	0,005	0,06	0,038	0,01
Сталь 45	0,42- 0,50	0,50- 0,80	0,17- 0,37	0,040	0,035	-	0,25	-

Таблица 3.2 Механические и физические свойства армко-железа и стали 45 ГОСТ1050-

$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_b , МПа	Ψ , %	δ , %	КСУ, Дж/см ²	HV
Армко-железо					
250	120	50	85	30	80...100
Сталь 45 ГОСТ 1050-88					
355	600	16	40	49	160...180

Кольцевые образцы устанавливались на специальной цилиндрической оправке с промежуточными кольцами и закреплялись гайкой (рис. 3.4). Промежуточные и экспериментальные кольца изготавливались одинаковых размеров, при этом промежуточные кольца использовались для внедрения и отвода инструмента при смене режима обработки. Тем самым обеспечивалась стационарность режима обработки ППД экспериментальных образцов, установленных между соседними промежуточными кольцами.

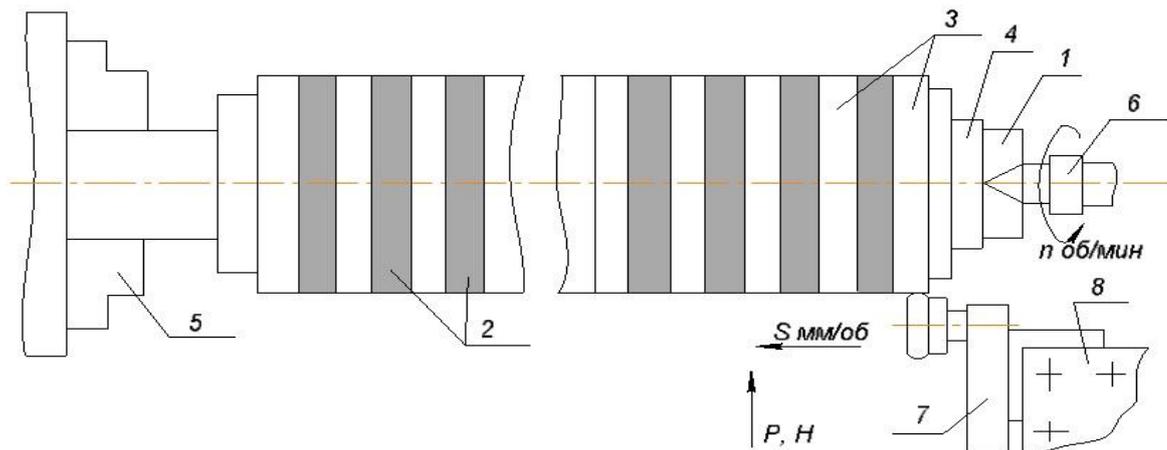


Рисунок 3.4 Схема специальной цилиндрической оправки с кольцевыми образцами: 1 – оправка; 2 – образцы; 3 – промежуточные кольца; 4 – гайка; 5 – токарный патрон; 6 – задний центр; 7 – устройство для ППД роликом; 8 – резцедержатель

Выбор конструкционной качественной стали 45 в качестве основного материала для исследований обусловлен, во-первых, ее широким применением в различных отраслях машиностроения.

Во-вторых, в базе данных научного коллектива имеется большой объем экспериментальных результатов для данной стали, что позволило получаемые данные сопоставлять с имеющимися, а также с результатами других авторов [15].

Проведение комплексных экспериментов на нелегированном металле высокой чистоты – армко-железе, является целесообразным, поскольку значительно облегчает

интерпретацию экспериментальных наблюдений. Выбор армко-железа в качестве модельного испытуемого материала обусловлен важностью понимания особенностей протекания процессов пластической деформации на зеренном, субзеренном, макромасштабном уровнях, а также подтверждения корректности разработанной феноменологической модели.

Экспериментальные образцы обрабатывались на токарном станке с ЧПУ с системой NC-201 в соответствии с режимами, представленными в таблице 3.3.

Таблица 3.3 Режимы токарной обработки образцов

Черновое			Получистовое			Чистовое		
t , мм	S , мм/об	n , об/мин	t , мм	S , мм/об	n , об/мин	t , мм	S , мм/об	n , об/мин
Цилиндрические образцы								
Материал: Армко-железо								
0,02	0,20	1600	0,02	0,05	1500	0,01	0,02	1200
Материал: Сталь 45 (ГОСТ 1050-88)								
0,50	0,30	1800	0,25	0,07	1600	0,10	0,05	1600
Кольцевые образцы								
Материал: Сталь 45 (ГОСТ 1050-88)								
0,25	0,28	1600	0,15	0,07	1600	0,05	0,07	1600

При этом геометрия режущей части инструмента из твердого сплава ВК3 составляла: задний угол $\alpha=9^\circ$; передний угол $\gamma=10^\circ$; угол наклона главной режущей части $\lambda=0^\circ$; главный угол в плане $\varphi=45^\circ$; вспомогательный угол в плане $\varphi_1=30^\circ$; применялась СОЖ – масло индустриальное «20».

К образцам, подвергнутым токарной обработке, предъявлялся ряд технологических требований:

- поверхность образцов не должна иметь коррозий, окалины, литейных корок, наклепов и прочих дефектов;
- параметр шероховатости поверхности рабочей части образцов должен быть не более $Ra\ 0,7$ по ГОСТ 2789-73.

После подготовки образцов следовал контроль их геометрических параметров, исходной шероховатости, химического состава и микроструктуры.

3.2.2 Выбор технологической оснастки

Для экспериментальных исследований применяли однороликовое приспособление для обкатывания, состоящее из трех основных узлов: корпуса (базового агрегата), сменной роликовой головки с МР-роликом и штока с пружиной. Роликовая головка устанавливается в корпус по конусу Морзе. Однороликовое приспособление с помощью державки устанавливалось в резцедержатель токарного станка с ЧПУ с системой NC-201.

Необходимое усилие ролика осуществлялось с помощью винтовой тарированной пружины в диапазоне от 500 до 5000 Н (50-500 кгс), величина сжатия которой фиксировалась с помощью индикатора часового типа *Tesa Instruments 355В*. Индикатор устанавливали с помощью магнитной стойки на суппорте токарного станка; цена деления индикатора составляла 0,002 мм.

Тарированная пружина обкатного устройства в рабочем диапазоне усилий имела линейную характеристику:

$$P = 1839 \times x, \quad (3.1)$$

где P – усилие, кгс; x – величина сжатия пружины, мм.

Тарировка устройства для обкатывания осуществлялась с помощью динамометра ДОСМ-3-0,5У, предназначенном для поверки рабочих средств измерений в помещениях лабораторного типа. Цена деления шкалы составляла не менее 0,1% наибольшего предела измерений. Размах показаний динамометров для возрастающих и убывающих нагрузок не превышает: от 10 до 20 % наибольшего предельного значения – 0,5% от измеряемой величины; от 20 до 100 % наибольшего предельного значения – 0,3% от измеряемой величины. Порог реагирования не превышает 0,02 % наибольшего предела измерения ISO376:2011.

В экспериментальном исследовании применены мультирадиусные ролики (МР-ролики) (рис 3.5, а) с рабочим профилем двух типов:

- МР-ролик (тип 1) с действительными натягами на инденторы:
 $h_{д1} = 0,02$ мм; $h_{д2} = 0,05$ мм; $h_{д3} = 0,01$ мм; $h_{д4} = 0,02$ мм (рис 3.5, б);
- МР-ролик(тип 2) с действительными натягами на инденторы:
 $h_{д1} = 0,05$ мм; $h_{д2} = 0,1$ мм; $h_{д3} = 0,15$ мм; $h_{д4} = 0,05$ мм (рис 3.5, в).

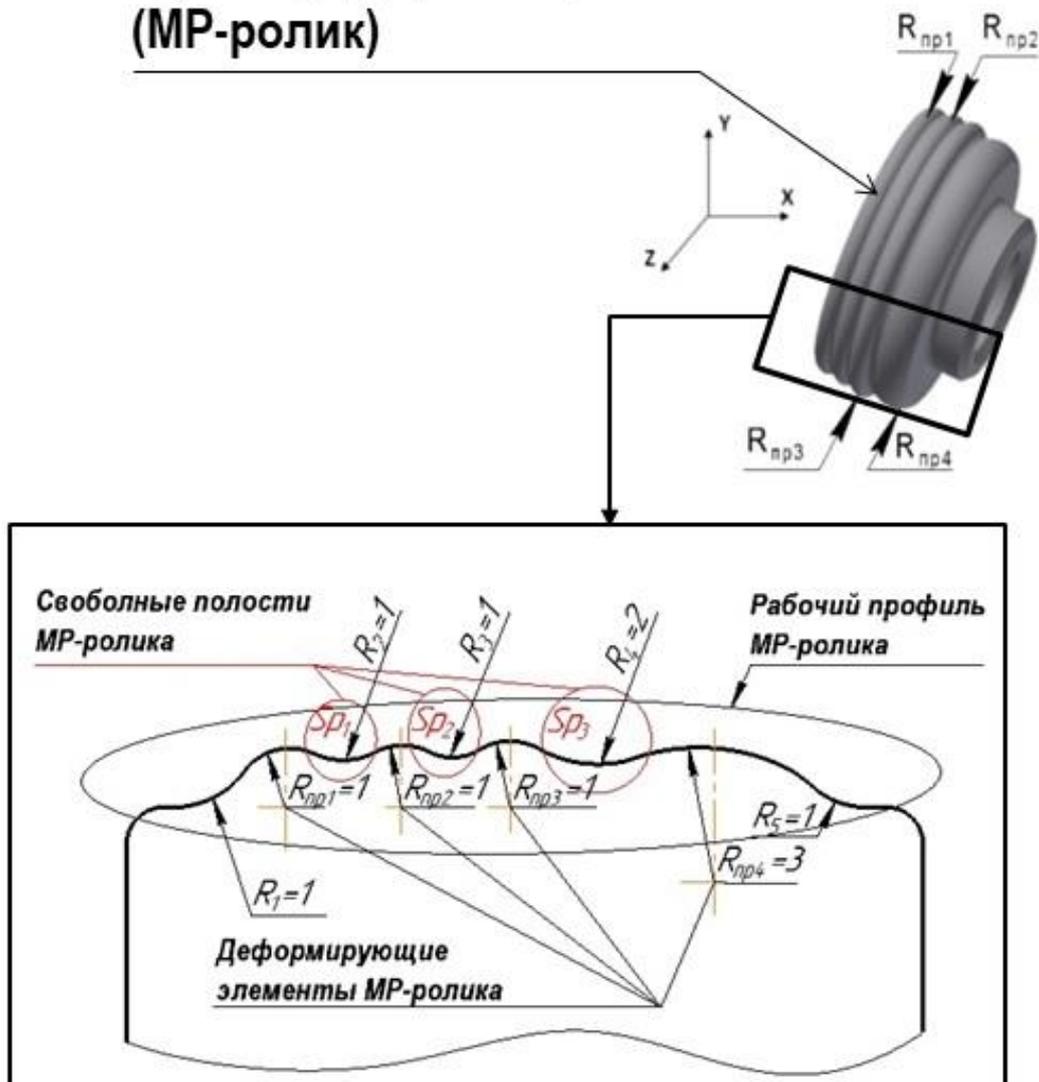
МР-ролики (рис. 3.5, б-в) были изготовлены из конструкционной подшипниковой стали ШХ15 (ГОСТ 801-78).

Наибольшими габаритными размерами являлся диаметр ролика – $\varnothing 61$ мм и ширина ролика – 13,28 мм. Чистый вес МР-ролика составил 0,26 кг.

Технические требования, указанные на поле чертежа:

- 1) закалить, 62...65 HRC;
- 2) на всех поверхностях МР-роликов не допускаются трещины, волосовины, забоины и другие дефекты, снижающие качество инструментов;
- 3) смазать индустриальным маслом;
- 4) неуказанные предельные отклонения размеров $\pm IT14/2$;
- 5) допуск радиального и торцевого биения на внутренние, торцевые и диаметрально-поверхности не превышает 0,003;
- 6) шероховатость: рабочего профиля $Ra 0,8$ мкм; посадочного диаметра $Ra 0,8$ мкм; торцевой поверхности $Ra 1,0$ мкм.

Мультирадиусный ролик (МР-ролик)



а)

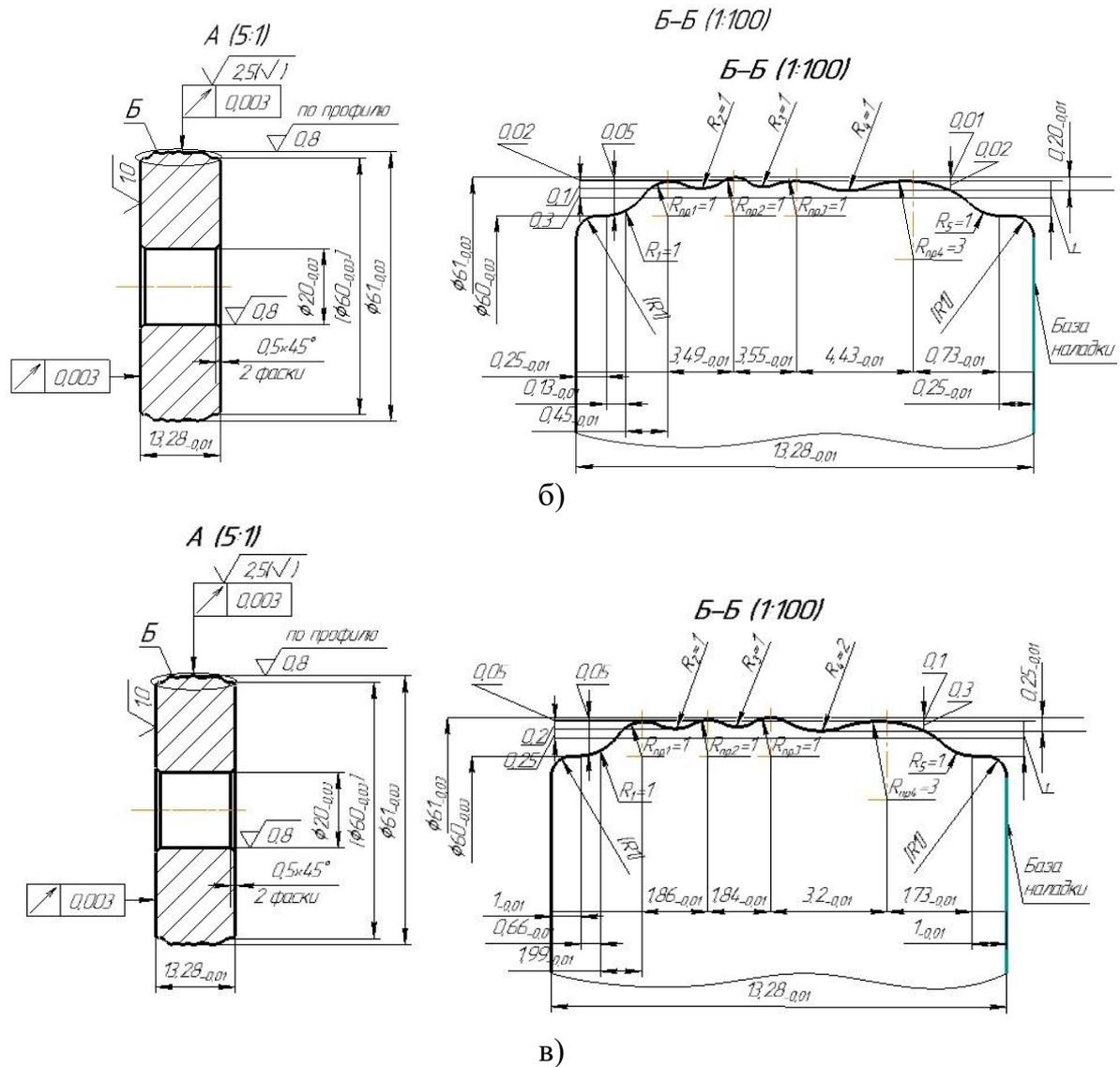


Рисунок 3.5 Мультирадиусный ролик (МР-ролик): а) 3D модель МР-ролика и схема рабочего профиля; б) фрагмент чертежа МР-ролика (тип 1) с натягами: $h_{д1} = 0,02$ мм; $h_{д2} = 0,05$ мм; $h_{д3} = 0,01$ мм; $h_{д4} = 0,02$ мм; в) фрагмент чертежа МР-ролика (тип 2) с натягами: $h_{д1} = 0,05$ мм; $h_{д2} = 0,1$ мм; $h_{д3} = 0,15$ мм; $h_{д4} = 0,05$ мм

Технологическая обработка исходных заготовок из стали ШХ15 для роликов заключалась в: черновой механической обработке на станке с ЧПУ, термической обработке, полустойкой и чистовой обработке на станке с ЧПУ, термической обработке, профильном шлифовании и полировании рабочего профиля МР-ролика на станке с ЧПУ. Конструктивные элементы рабочего профиля МР-ролика с соответствующими размерами, представлены в таблице 3.4 (см. также рис. 3.5). Анализируя элементы рабочего профиля можно сказать, что деформирующими элементами МР-ролика для типа 1 и типа 2, являются три профильных радиуса ($R_{пр1}$, $R_{пр2}$, $R_{пр3}$) величиной 1 мм, выполняющие упрочняюще-деформирующую функцию, а также четвертый профильный радиус ($R_{пр4}$)

величиной 3 мм, выполняющий деформирующе-сглаживающую функцию. Свободные полости МР-ролика (S_{p1} , S_{p2} , S_{p3}), расположенные между деформирующими элементами, будут выполнять функцию, аналогичную рабочей полости-ручья штампа. Профильные радиусы ($R_{пр1}$, $R_{пр2}$, $R_{пр3}$ и $R_{пр4}$) будут выполнять функцию аналогичную заусенечным канавкам при штамповке в открытых штампах, и являются регуляторами давления.

Отличительными особенностями МР-ролика (тип1) от (тип 2) является следующее:

- для МР-ролика (тип 1) выбраны наименьшие значения действительных натягов и наибольшие расстояния между вершинами ДЭ;
- для МР-ролика (тип 2) выбраны наибольшие значения действительных натягов и наименьшие расстояния между вершинами деформирующих элементов.

Таблица 3.4 Размеры конструктивных элементов рабочего профиля МР-роликов

Конструктивные элементы рабочего профиля МР-роликов														
Деформирующие элементы (ДЭ), мм				Действительные натяги на ДЭ, мм				Свободные полости между ДЭ			Расстояние между вершинами ДЭ, мм			
								Радиус, мм						
$R_{пр1}$	$R_{пр2}$	$R_{пр3}$	$R_{пр4}$	$h_{д1}$	$h_{д2}$	$h_{д3}$	$h_{д4}$	S_{p1}	S_{p2}	S_{p3}	$R_{пр1}$ и $R_{пр2}$	$R_{пр2}$ и $R_{пр3}$	$R_{пр3}$ и $R_{пр4}$	
МР-ролик (тип 1)														
1	1	1	3	0,02	0,05	0,01	0,02	1	1	1	3,49	3,55	4,43	
МР-ролик (тип 2)														
1	1	1	3	0,05	0,10	0,15	0,05	1	1	2	1,86	1,84	3,2	

3.2.3 Методика и режимы обработки ППД МР-роликом

Было проведено четыре серии экспериментов:

- 1 серия. Статическое вдавливание, радиальное внедрение МР-ролика без вращения детали. Проведен эксперимент по схеме «внедрение-отвод» инструмента с усилием 3000 Н (табл.3.5); при этом подача и вращение детали были исключены. Подробнее методика изложена в подразделе 3.3.1.
- 2 серия. Обработка при радиальном внедрении МР-ролика при вращении детали. Режимы обработки представлены в таблице 3.5. Данная серия экспериментов проводи-

лась с целью установления последовательности внедрения инденторов. Подробнее методика изложена в подразделе 3.3.2.

- 3 серия экспериментов заключалась в создании стационарного очага деформации при обработке МР-роликом. Режимы обкатывания представлены в таблице 3.5. Подробнее методика изложена в подразделе 3.3.3.
- 4 серия экспериментов заключалась в отделочно-упрочняющей обработке цилиндрических и кольцевых образцов из стали 45 и армко-железа МР-роликом по режимам, представленным в таблице 3.6.

Таблица 3.5 Режимы обработки МР-роликом образцов 1- 3 серии экспериментов

№ п/п	Образец, материал	Режим обработки					
		Подача, S, мм/об	Частота вращения, n, об/мин	Усилие, P, Н			
				Последовательность работы инденторов			
				1	2	3	4
		R _{пр3}	R _{пр2}	R _{пр1}	R _{пр4}		
1 серия. Методика исследования очага деформации при радиальном внедрении МР-ролика без вращения детали							
1	Образец №1, армко-железо	-	-	3000			
2 серия. Методика исследования очага деформации при радиальном внедрении МР-ролика при вращении детали							
2	Образец №2, сталь 45	-	630	205	230	290	395
3	Образец №3, армко-железо	-		185	230	260	330
3 серия. Методика исследования стационарного очага деформации при обработке МР-роликом							
4	Образец №4, сталь 45	0,05	630	1700			
5	Образец №5, сталь 45			2100			
6	Образец №6, сталь 45			2900			
7	Образец №7, сталь 45			2500			
8	Образец №8, сталь 45	0,07	800	4750			

Таблица 3.6 Режимы обкатывания и состояние образцов - 4 серия экспериментов

№ образца, состояние	Усилие обкатывания, P, Н	Подача, S, мм/об	Частота, n, об/мин
Цилиндрические образцы			
Армко-железо			
Образец №1, обработка МР-роликом по режиму 1	800	0,07	630
Образец №2, обработка МР-роликом по режиму 2	2700		
Сталь 45			
Образец №3.0, обработка МР-роликом по режиму 3.0	3000	0,07	630
Образец №3.1, нанесение отпечатка от МР-ролика 3.1			
Образец №4, обработка МР-роликом по режиму 4			

Образец №5, обработка МР-роликом по режиму 5	800		
Образец №6, обработка МР-роликом по режиму 6	1500		
Образец №7, обработка МР-роликом по режиму 7	2000		
Образец №8, обработка МР-роликом по режиму 8	2500		
Образец №9, обработка МР-роликом по режиму 9	3005	0,1	1000
Образец №10, обработка МР-роликом по режиму 10		0,08	800
Образец №11, обработка МР-роликом по режиму 11	3600	0,05	650
Образец №12, обработка МР-роликом по режиму 12			
Образец №13, обработка МР-роликом по режиму 13	4500	0,07	800
Образец №14.0, нанесение отпечатка от МР-ролика 14.0			
Образец №14.1, обработка МР-роликом по режиму 14.1	4750		
Кольцевые образцы			
Сталь 45			
Образец №15, обработка МР-роликом по режиму 15	2500	0,07	630
Образец №16, обработка МР-роликом по режиму 16	2000		
Образец №17, обработка МР-роликом по режиму 17	1000		

3.3 Методики исследования формирования очага деформации при ППД МР-роликом

Данные локальные экспериментальные исследования выполнялись как для оценки формирования очагов деформации, которые являлись исходными данными для расчета напряженно-деформированного состояния методом конечно-элементного моделирования, решения задач механики, так и для разработки феноменологической модели процесса ППД МР-роликом.

Кроме того, данные исследования проводились с целью определения влияния геометрии контактных и внеконтактных зон очага деформации на качество поверхностного слоя после обработки ППД МР-роликом. В результате, совокупность примененных методик исследования очагов деформации в дальнейшем позволит выявить закономерности изменения зон пластической деформации.

3.3.1 Методика исследования очага деформации при радиальном внедрении МР-ролика без вращения детали

С целью установления формы и размеров контуров площадок контакта от инденторов МР-ролика, был проведен эксперимент по схеме «внедрение-отвод» инструмента (рис. 3.6) с усилием 3000 Н (табл.3.6); при этом подача и вращение детали были исключены.

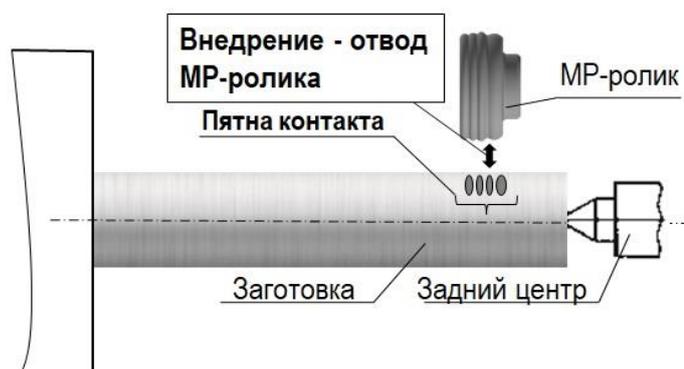


Рисунок 3.6 Схема получения контуров площадок контакта от инденторов на ПС детали, при радиальном внедрении МР-ролика

В результате были получены контуры площадок контакта МР-ролика с характерными контактными и внеконтактными зонами очагов деформации от инденторов.

Наличие таких данных позволит: во-первых, определить геометрические параметры зоны пластической деформации, в том числе площадь контакта; во-вторых, в дальнейшем оптимизировать режимы обкатывания с целью обеспечения максимальной глубины упрочняемого слоя. В тоже время, полученные данные будут способствовать формированию феноменологической модели процесса ППД МР-роликом.

3.3.2 Методика исследования очага деформации при радиальном внедрении МР-ролика при вращении детали

На рисунке 3.5 (а) представлена 3D-модель МР-ролика, его общий вид. Из рисунка 3.5(а) видно последовательное расположение профильных радиусов: $R_{пр1}$, $R_{пр2}$, $R_{пр3}$ и $R_{пр4}$ МР-ролика. Однако в связи с разными действительными натягами инденторов МР-ролика, последовательность внедрения профильных радиусов в ПС детали будет иная.

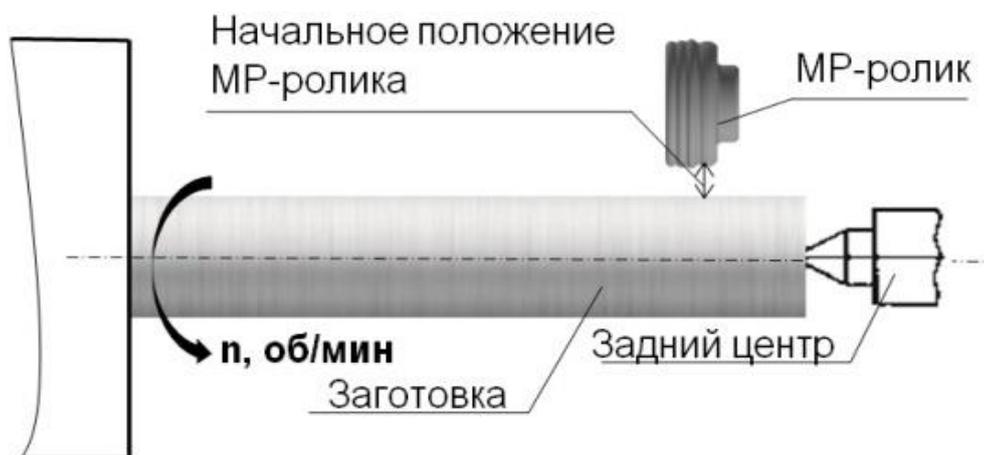
Согласно приведенному выше описанию конструктивных элементов рабочего профиля МР-ролика, можно сказать, что конструкция имеет оригинальную геометрию, элементы которой выполняют определенную функцию, описанную в подразделе 3.2.2. Поскольку ранее МР-ролик не был изучен, а также с целью установления последовательности работы инденторов МР-ролика был проведен эксперимент по статическому внедрению (без включения подачи с частотой вращения $n=630$ об/мин) ролика в ПС заготовки, который заключался в следующем:

1. МР-ролик внедрялся по упругой схеме с усилием (P , H), отрегулированным в процессе, до того момента, пока на ПС заготовки не появлялся первый пластический отпечаток от деформирующего индентора МР-ролика. При этом на поверхности заготовки, а именно в зоне появления пластического отпечатка от индентора ролика, не допускалось появления признаков разрушения металла ПС – шелушения, отслаивания, трещин и т.п.

2. Далее, производился отвод МР-ролика и последующее его перемещение в осевом направлении на расстояние, достаточное для того, чтобы следующий пластический отпечаток не влиял на отпечаток от предыдущего индентора. Таким образом данная последовательность действий повторялась аналогичным образом, до того момента, пока не были внедрены все четыре профильных радиусов ($R_{пр1}$, $R_{пр2}$, $R_{пр3}$ и $R_{пр4}$) МР-ролика (рис.3.7).

Режимы обработки, усилия внедрения (P , H) представлены в таблице 3.6. Важно отметить, что в связи с тем, что каждый из четырех деформирующих инденторов МР-ролика (тип 2) имел разные действительные натяги, при проведении данного исследования были подобраны разные усилия на каждый индентор. Усилия подбирались таким образом:

- при внедрении одного из инденторов МР-ролика (тип 2) с максимально возможным усилием, визуально наблюдалось образование пластического отпечатка;
- признаком того, что индентор был внедрен на всю величину натяга, и значения усилия подобраны верно, являлось появление едва заметного следа пластического отпечатка от следующего индентора МР-ролика, а также отсутствие следов разрушения поверхности образца;



а)

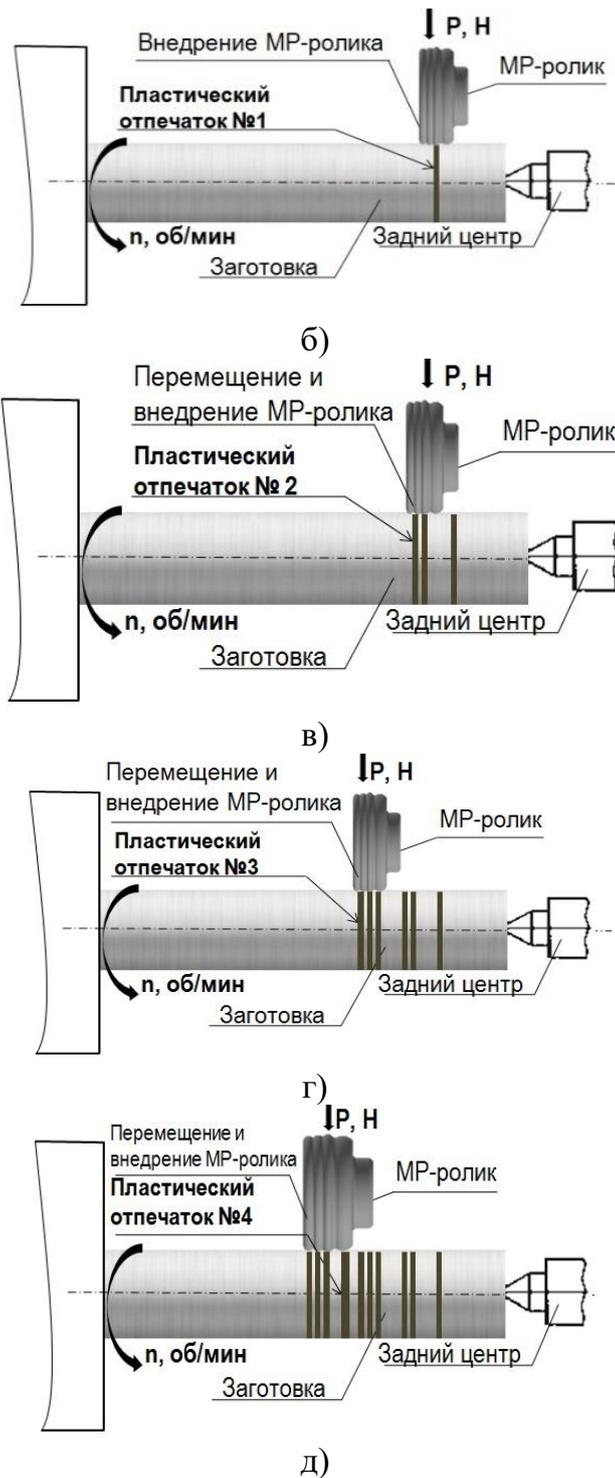


Рисунок 3.7 Схема проведения статического внедрения MP-ролика при вращении образца: а) начальное положение MP-ролика; б) получение первого пластического отпечатка; в) получение второго пластического отпечатка; г) получение третьего пластического отпечатка; д) получение четвертого пластического отпечатка

В результате проведения данного эксперимента было установлено: во-первых, изменение размеров пластически-деформированной области; во-вторых, последовательность работы деформирующих элементов MP-ролика, а также геометрические параметры пластических отпечатков.

3.3.3 Методика исследования очага деформации при обработке МР-роликом

С целью создания стационарного очага деформации был проведен эксперимент по обработке образца ППД МР-роликом с последующим выключением подачи и быстрым отводом инструмента.

Эксперимент проходил в два этапа:

1. На первом этапе эксперимента на один образец с разными усилиями были нанесены четыре пластических отпечатка (табл. 3.4, образцы № 4,5,6,7,8) МР-роликом (тип 2) по схеме «внедрение-отвод» (рис.3.8) по режимам, представленным в таблице 3.6.

Данный этап был необходим для того, чтобы установить максимальные и минимальные значения усилия (P , H), при которых на поверхности детали возникнут одновременно все четыре пластических отпечатка от инденторов МР-ролика, и при которых на поверхности детали не будут появляться следы разрушения ПС.

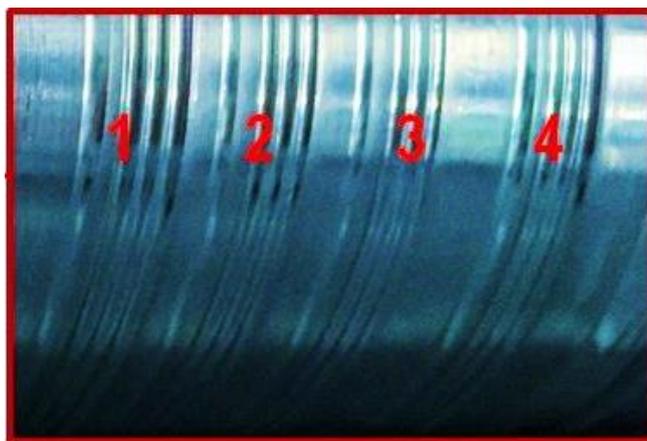


Рисунок 3.8 Фото пластических отпечатки от МР-ролика

2. Второй этап заключался в следующем. На образце №8 обкатывался участок по режиму, приведенному в таблице 3.6 (рис.3.9, а).

В конце обработки участка образца выключалась подача инструмента, при этом образец и МР-ролик вращались до тех пор, пока на поверхности образца не появлялся пластический отпечаток от всех инденторов МР-ролика (рис. 3.9, б). Данный этап позволил создать стационарный очаг деформации.

Важно отметить, что несмотря на интенсивный режим обработки образцов (максимальное усилие 4750 Н) и большие действительные натяги деформирующих элементов (до 0,15 мм), в процессе обработки на поверхности образца не наблюдалось следов разрушения.

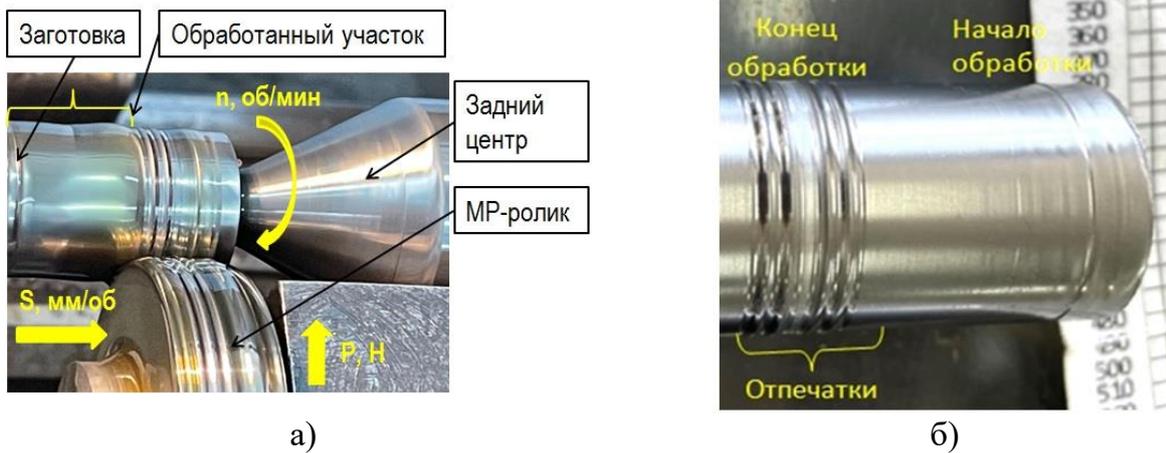


Рисунок 3.9 Фото: а) процесса создания стационарного очага деформации;
 б) образца с обработанным участком и пластическими отпечатками от МР-ролика

После проведения локальных экспериментов, описанных в подразделах 3.3.1-3.3.3, на образцах были получены пластические отпечатки от инденторов МР-ролика. В дальнейшем на получившиеся пластические отпечатки был нанесен состав на основе эпоксидной смолы. После затвердевания состава слепки снимались с образца, разрезались в меридиональном сечении и шлифовались. После этого производилось фото слепка, загрузка фото в графический редактор, масштабирование и выравнивание полученного изображения, и измерение геометрических параметров пластических отпечатков.

Таким образом, проведение экспериментов, описанных в подразделах 3.3.1-3.3.3, позволит установить основные зависимости параметров качества ПС и геометрии очагов деформации от режимов обработки; определить комплекс начальных и граничных условий для МКЭ-моделирования процесса и решения задач механики; провести анализ влияния геометрических параметров ОД на параметры механики; также разработать феноменологическую модель процесса ППД МР-роликом.

3.4 Методика исследования шероховатости поверхности

После обработки МР-роликом экспериментальных образцов проводилось измерение шероховатости и волнистости обработанной поверхности на профилографе-профилометре «*Talysurf-5M*» фирмы *Rank Taylor-Hobson*, представляющем собой измерительную систему модульной конструкции.

Большая часть данных измерения получается в результате выполнения одного перемещения датчика игольчатого типа над поверхностью; значения параметров затем выбираются по желанию из запоминающих устройств. Система обеспечивает возможность

раздельной или комбинированной оценки этих двух характеристик. С помощью системы были получены графики шероховатости, волнистости или несглаженного профиля.

В таблице 3.7 приведены технические параметры процессора прибора. При измерении шероховатости поверхности экспериментальных образцов использовались следующие параметры: базовая длина составила 0,08мм; длина трассы 0,56 мм; вертикальное увеличение $\times 200$; горизонтальное увеличение $\times 5$.

Таблица 3.7 Технические параметры процессора прибора

Технический параметр процессора	Значение
Базовые длины	0,08; 0,25; 0,8; 2,5; 8 мм
Вертикальное увеличение V_v	$\times 100, \times 200, \times 500, \times 1000, \times 2000, \times 5000, \times 10000, \times 20000, \times 50000, \times 100000$
Горизонтальное увеличение V_h для профилограмм, построенных по данным из ЗУ	$\times 2, \times 5, \times 10, \times 20, \times 50, \times 100, \times 200$;

Прибор «Talysurf-5M» позволяет оценивать следующие параметры шероховатости поверхности образцов (табл.3.8).

Таблица 3.8 Основные обозначения параметров шероховатости

Параметр шероховатости	Условное обозначение
Среднее арифметическое отклонение профиля	R_a , мкм
Высота наибольшего выступа профиля	R_p , мкм
Глубина наибольшей впадины профиля	R_v , мкм
Высота неровностей профиля по десяти точкам	R_z , мкм
Наибольшая высота неровностей профиля	R_{max} , мкм
Средний шаг неровностей профиля	S_m , мкм
Средний шаг неровностей профиля по вершинам	S , мкм
Относительная опорная длина профиля	t_p , где $p = 5; 10; 15; 20; 25; 30; 40; 50; 60; 70; 80; 90\%$ - уровень сечения профиля.

3.5 Методика исследования упрочнения поверхностного слоя

3.5.1 Пробоподготовка образцов для последующего измерения микротвердости

Пробоподготовка обкатанных образцов проводилась в несколько этапов:

- вырезка из обработанной части образцов плоскопараллельного участка;
- запрессовка в эпоксидную смолу;
- шлифовально-полировальная обработка;
- травление поверхности азотной кислотой.

Учитывая особенности протекания деформационных процессов, длина исследуемой поверхности образцов выбиралась исходя из длины предполагаемого очага деформации и пути деформирующего инструмента – МР-ролика, с целью исключения краевых дефектов. Высота образцов выбиралась исходя из ожидаемой глубины упрочнения, а также должна превышать размеры очага деформации в данном направлении (не менее чем в 3 раза).

Вырезка сегментов осуществлялась с помощью комбинированного отрезного станка *Discotom-6* (рис. 3.10). Станок позволяет осуществлять разрезку без деформации и прижогов, что особенно важно для чувствительных к перегреву материалов; используемый отрезной круг – 10S25.

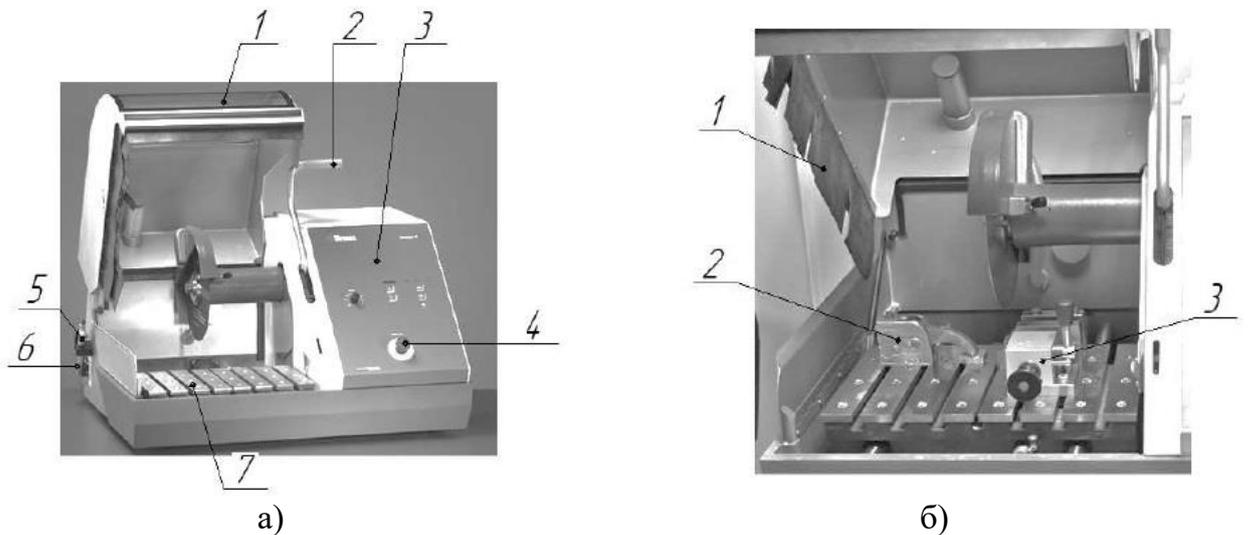


Рисунок 3.10 Фото отрезного станка *Discotom-6*: а) общий вид: 1 – защитный кожух с окном; 2 – рукоятка ручной подачи отрезного диска; 3 – панель управления; 4 – кнопка экстренного останова; 5 – промывочный шланг; 6 – переключатель управления подачей охлаждающей жидкости; 7 – отрезной стол; б) рабочее пространство станка: 1 – гибкая боковая панель; 2 – вертикальная зажимная система; 3 – рециркуляционная охлаждающая система; 3 – устройство для установки и фиксации образцов

Запрессовка вырезанного сегмента осуществлялась в термоактивную, с средней скоростью снятия, черную смолу *MultiFast*; состав – фенольная смола с древесным наполнителем. Запрессовка образцов производилась на автоматическом электрогидравлическом прессе *CitoPress-1* (рис. 3.11).

Пресс предназначен для горячей запрессовки образцов в различные смолы. Использование смол позволяет проводить шлифование и полирование образцов без заваливания кромок, что крайне важно для исследования поверхности на поперечном срезе.

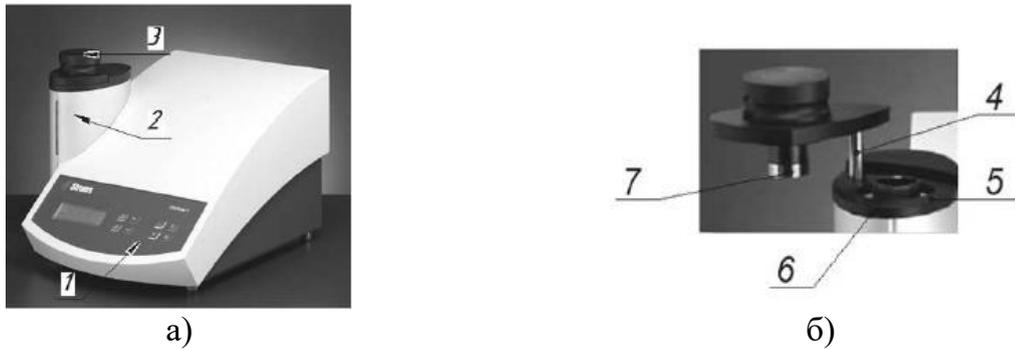


Рисунок 3.11 Фото пресса CitoPress-1: а) общий вид: 1 – передняя панель; 2 – кожух монтажного блока; 3 – верхняя крышка; б) подъемник верхней крышки: 4 – поворотный рычаг верхней крышки; 5 – верхняя плита монтажного блока; 6 – монтажный блок; 7 – верхний плунжер

Обработку поверхностей фрагментов осуществляли на шлифовально-полировальной системе *Tegramin-25* (рис. 3.12). Шлифование производилось в несколько этапов:

- предварительное шлифование кругами зернистостью 800 и 1200 мкм (шлифовальный диск *MD-Piano* – алмазный диск для шлифования материалов твердостью *HV* 150-2000, используемый лубрикант – вода);
- тонкое шлифование кругом зернистостью 4200 мкм (шлифовальный диск – *MD-Largo* – стальной композиционный диск для шлифования материалов с твердостью *HV* 40-150 с использованием алмазного абразива, используемый лубрикант – смазочно-охлаждающая жидкость *DP-Lubricants*);
- полирование вручную алмазной пастой НОМ (ГОСТ 25593-83) зернистостью: 3/0; 1/0 мкм, с целью удаления рисок от шлифования и придания поверхности шлифа зеркального вида;
- травление поверхности на глубину 0,15 мм 4%-м раствором азотной кислоты HNO_3 .

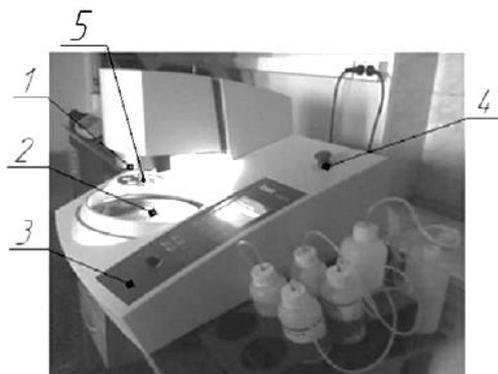


Рисунок 3.12 Фото шлифовально-полировального станка *Tegramin-25*: 1 – дозирующий модуль с форсунками; 2 – вращающаяся платформа; 3 – Передняя панель, на которой

расположены элементы управления; 4 – кнопка аварийного останова (для останова необходимо нажать красную кнопку; чтобы отжать красную кнопку, необходимо повернуть ее по часовой стрелке); 5 – держатель образцов

По окончании всех этапов пробоподготовки были получены металлографические шлифы.

На рисунке 3.13 приведена схема вырезки из обработанной части образцов плоскопараллельного участка и получаемый металлографический шлиф.

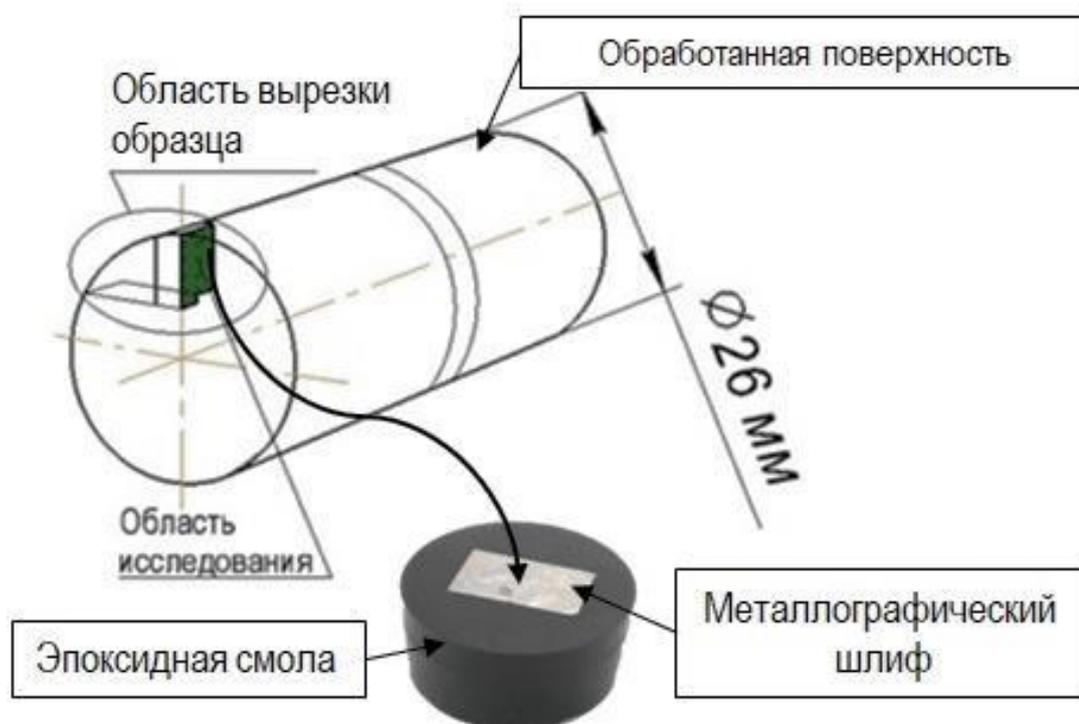


Рисунок 3.13 Схема вырезки образца из обработанной поверхности и фото металлографического шлифа

3.5.2 Методика измерения микротвердости

Ранее в подразделах 3.3.1-3.3.3 были описаны методики исследования очага деформации ППД МР-роликом. В связи с тем, что конструкция МР-ролика имеет оригинальную геометрию, согласно которой каждый элемент рабочего профиля выполняют определенную функцию (подраздел 3.2.2), измерение микротвердости по мнению автора должно производиться по оригинальной схеме, учитывая конструкцию МР-ролика и ранее полученную информацию о параметрах очага деформации. В совокупности такой подход позволит наиболее точно выполнить анализ пластического течения металла, выявить зоны перекрытия очагов деформации, что в свою очередь дает достаточно полное представление о процессе ППД МР-роликом. В дальнейшем полученные данные помо-

гут оптимизировать режимы обкатывания исходя из требуемого качества поверхностного слоя.

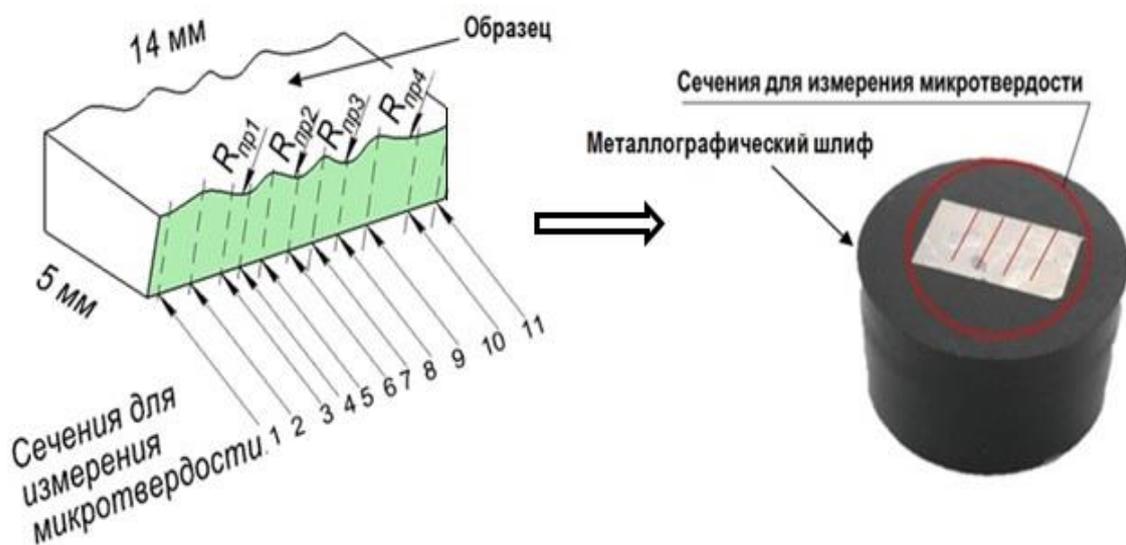
Упрочнение обкатанных образцов исследовалось по распределению микротвердости в поверхностном слое экспериментальных шлифов по методу Виккерса.

Испытание на микротвердость вдавливанием по методу восстановленного отпечатка осуществлялось на микротвердомере *DuraScan 20* (3.14, а).

Измерение значений микротвердости осуществлялось в соответствии со схемой, представленной на рисунке 3.14 (б-в).

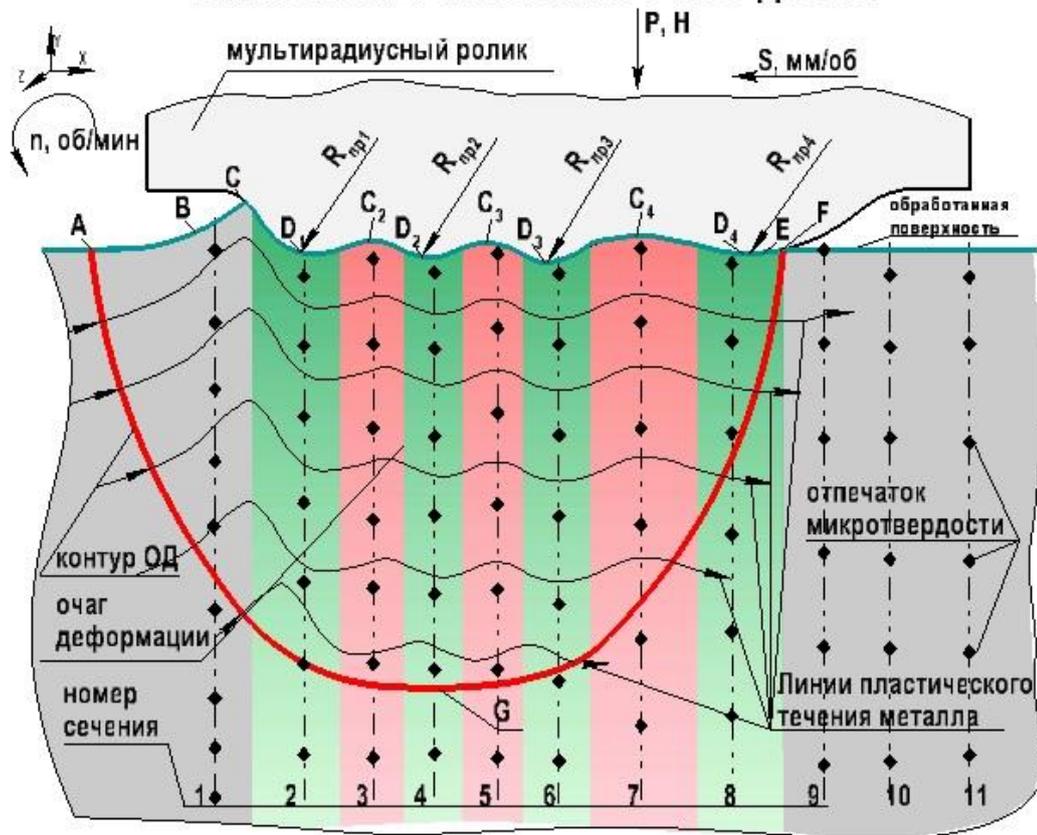


а)



б)

СХЕМА ИЗМЕРЕНИЯ МИКРОТВЕРДОСТИ



в)

Рисунок 3.14 Схема измерения микротвердости: а) фото микротвердомера *DuraScan 20:1* – стойка машины; 2 – испытательный узел; 3 – турель с индентором и объективами; 4 – испытательная наковальня; 5 – блок управления; 6 – кнопка аварийного выключения; б) образец и общая схема измерения микротвердости; в) область исследований, сечения для измерения микротвердости

Серия измерений микротвердости проводилась по поверхности шлифа (рис.3.14, в), а затем измерялось расстояние до каждого отпечатка.

Анализ микротвердости (рис.3.14, в) производился как по глубине упрочнения, так и по сечениям:

- сечение 1 – зона подъема и вершины пластической волны (криволинейная *ABC*) впереди первого индентора $R_{пр1}$ (рис.3.14, в);
- сечения 2, 4, 6, 8 – зоны под вершинами инденторов МР-ролика: $R_{пр1}, R_{пр2}, R_{пр3}, R_{пр4}$ (рис. 3.14, в, точки: D, D_2, D_3, D_4);
- сечения 3, 5, 7 – зоны между инденторами ($R_{пр1}$ и $R_{пр2}, R_{пр2}$ и $R_{пр3}, R_{пр3}$ и $R_{пр4}$), именуемые в подразделе 3.2.2, как «свободные полости» МР-ролика (рис.3.14, в);

- сечения 9, 10, 11–внеконтактная задняя часть четвертого индентора ($R_{пр4}$) (рис.3.14, в).

Известно, что в двухфазном поликристаллическом материале, в случае стали 45, структурные составляющие характеризуются разными показателями микротвердости. В связи с данным обстоятельством было необходимо исследовать упрочнение каждой из составляющих, а также получить результат их совместного взаимодействия. Поэтому были измерены значения микротвердости для зёрен перлита и феррита (рис.3.15).

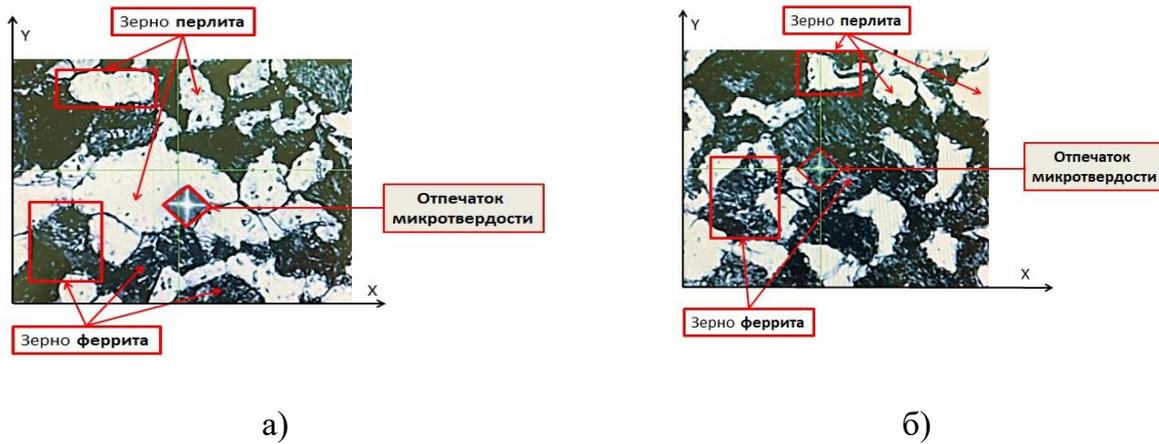


Рисунок 3.15 Схема измерения микротвердости зёрен перлита и феррита (сталь 45): а) в зерне перлита (неупрочненный слой); б) в зерне феррита (неупрочненный слой)

Помимо образцов из стали 45, значения микротвердости определялись и для образцов из армко-железа. В связи с тем, что особенности измерения микротвердости армко-железа не отражены в существующем нормативном документе ГОСТ 9450, был проведен ряд измерений с разными нагрузками. Установлено, что наибольшая точность измерений армко-железа обеспечивается при малой нагрузке ($HV 0,1$). С целью нивелирования погрешностей измерений, у боковой грани ранее полученного отпечатка расстояние между центрами последующих превышало размер его диагонали более чем в 2,5 раза.

После проведения серии измерений микротвердости строили кривую распределения по глубине поверхностного слоя, откладывая по оси абсцисс глубину расположения отпечатка h , а по оси ординат – величину микротвердости по Виккерсу HV . Глубину упрочнения определяли, как толщину слоя с увеличенной по сравнению с исходной микротвердостью. Степень упрочнения δ определяли по формуле:

$$\delta_n = \frac{HV_n - HV_0}{HV_0} \times 100\%,$$

где HV_{II} – максимальная микротвердость поверхностного слоя; HV_0 – исходная микротвердость металла; n – номер сечения.

3.6 Методики тонких физических исследований упрочненного поверхностного слоя

3.6.1 Пробоподготовка образцов для тонких физических исследований

После обкатывания МР-роликом следовала пробоподготовка металлографических шлифов для оптической (ОМ), атомно-силовой микроскопии (АСМ) и рентгеноструктурного анализа (РСА).

Учитывая особенности протекания деформационных процессов, длина исследуемой поверхности образцов выбиралась исходя из длины предполагаемого очага деформации и пути деформирующего инструмента – МР-ролика, с целью исключения краевых дефектов. Высота образцов выбиралась исходя из ожидаемой глубины упрочнения, а также должна превышать размеры очага деформации в данном направлении (не менее чем в 3 раза).

На поверхности металлографических шлифов не допускалось наличия любых дефектов. Пробоподготовка шлифов заключалась в:

- вырезке плоскопараллельных сегментов (размеры сегментов: длина не более 10 мм, ширина не более 20 мм и высота не более 10 мм);
- маркировке;
- запрессовке в эпоксидную смолу;
- шлифовании кругами с зернистостью: 120; 220; 600; 1200; 2400 мкм.
- предварительном полировании кругами с зернистостью 9; 6; 3 мкм.
- полировании вручную алмазной пастой НОМ (ГОСТ 25593-83) зернистостью: 3/0; 1/0; 0,5/0 мкм, с целью удаления рисок от шлифования и придания поверхности шлифа зеркального вида. При этом каждый раз при переходе к следующему этапу полирования, образцы протирались от загрязнений ватой, смоченной в спирте, просушивались фильтровальной бумагой и поворачивались на 90° , с целью выведения рисок от предыдущих операций;
- травлении поверхности на глубину 0,15 мм 4%-м раствором азотной кислоты HNO_3 . Травление поверхности шлифов проводилось до появления матового оттенка на

поверхности; не допускалось наличия каких-либо пятен. Травление осуществлялось протиранием ватой, смоченной в азотной кислоте, после этого поверхность образцов промывалась в спирте и просушивалась фильтровальной бумагой.

Стоит отметить, что вследствие особенностей протекающих процессов в поверхностном слое (ПС) обработанного материала, такие методы исследования, как оптическая и атомно-силовая микроскопия проводились, как в упрочненном ПС в четырех точках (точки 1, 2, 3, 4), расположенных на расстоянии $\pm 0,02$ мм от свободного края поверхности, так и в неупрочненном слое (точка 5, центр образца) на расстоянии 0,4-0,5 мм от свободного края поверхности.

На рисунках 3.16-3.17 представлены схемы исследования упрочненных образцов методами ОМ, АСМ и РСА.

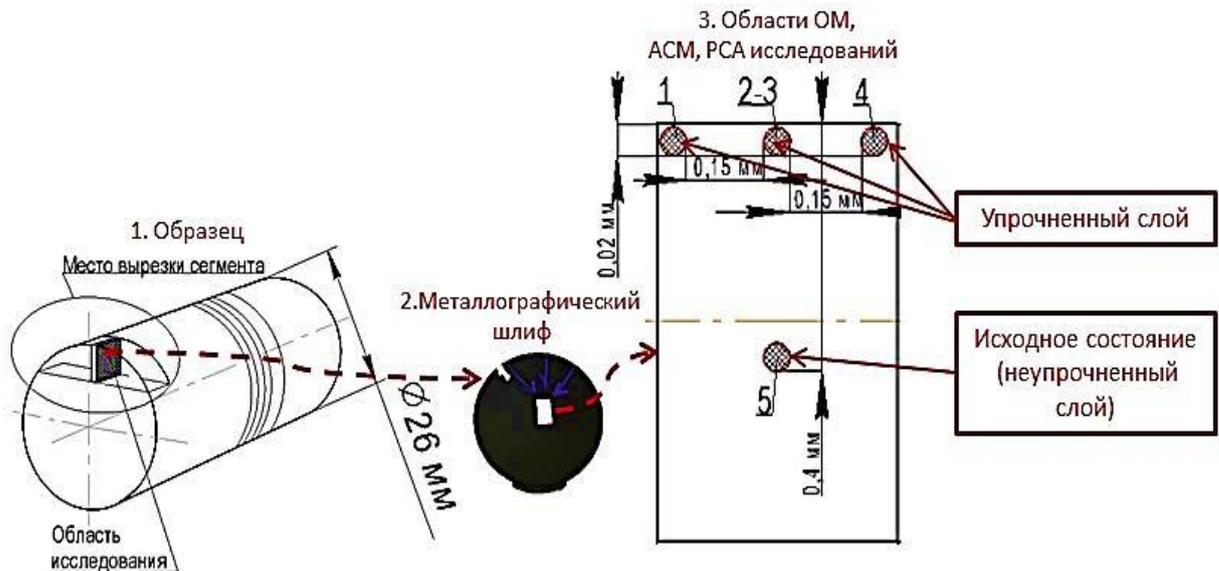


Рисунок 3.16 Схема исследования образцов методами ОМ, АСМ и РСА: 1 – точка сканирования (левый, верхний край шлифа, упрочненный слой); 2-3 – точки сканирования (середина шлифа, упрочненный слой); 4 – точка сканирования (правый, верхний край шлифа, упрочненный слой); 5 – точка сканирования (центр шлифа, неупрочненный слой)



а)

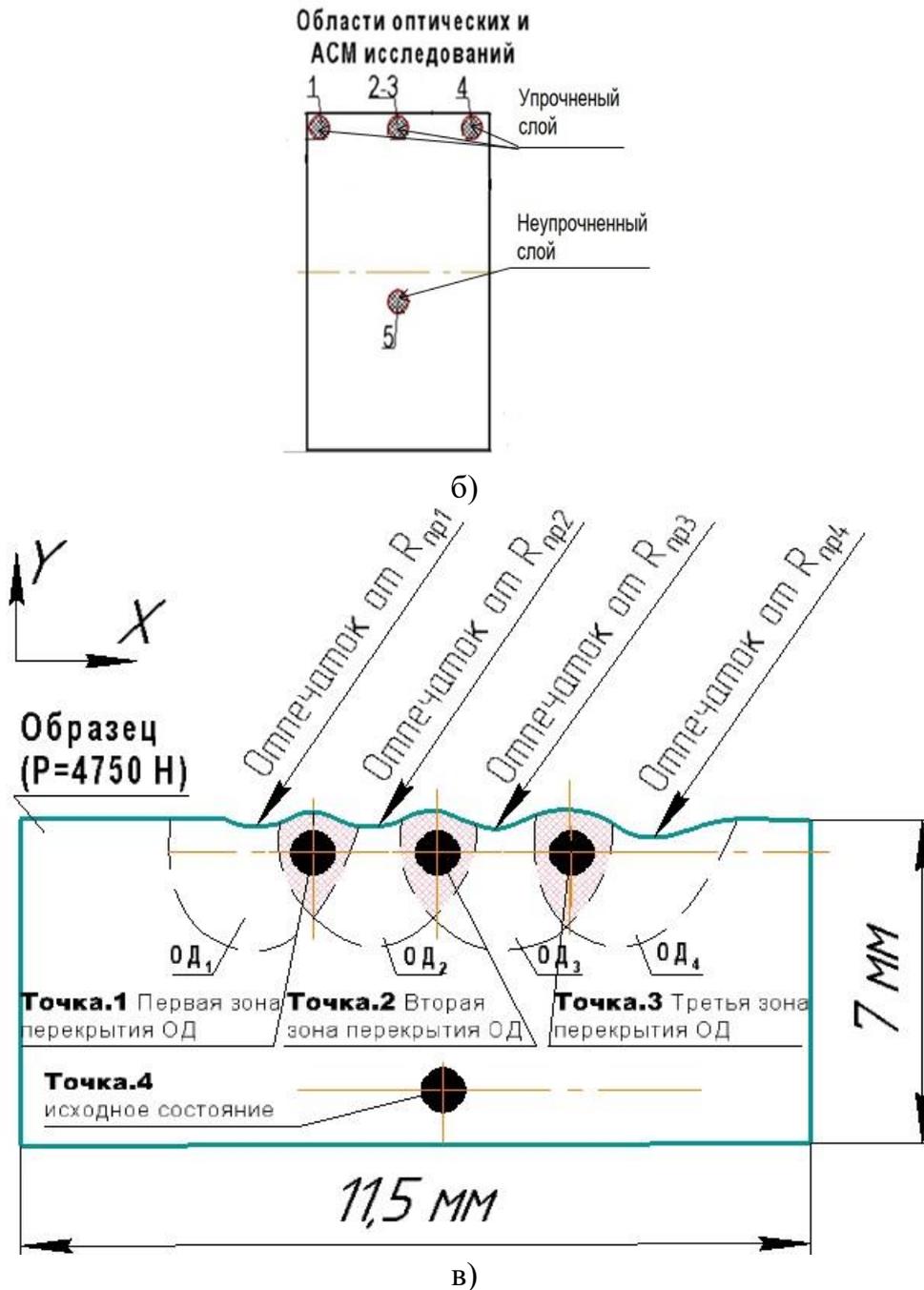


Рисунок 3.17 Схема исследования образца методами ОМ, АСМ и РСА с обработанным участком и участком с пластическим отпечатком после ППД МР-роликом: а) схема вырезки исследуемого участка; б) исследуемые области участка, обработанного МР-роликом; в) схема исследования очага деформации методом РСА

3.6.2 Методика проведения оптической микроскопии (ОМ), атомно-силовой микроскопии (АСМ) и рентгеноструктурного анализа

Параметры структуры исследуемых шлифов, а именно: размеров зёрен и субзёрен, их однородности определялись металлографически на оптическом микроскопе отраженного света «Neophot-21» при увеличении 200 и 500 крат. Величина зерна опреде-

лялась методом подсчета пересечений границ зёрен при увеличении 200 крат по ГОСТ 5639-82 [270].

Тонкую структуру поверхности шлифов исследовали на атомно-силовом микроскопе *SolverPH47-PRO* (рис.3.18, а) (изготовитель ЗАО «Нанотехнология-МДТ», Зеленоград, Россия [271]).

Основными функциональными устройствами, входящими в состав прибора являются:

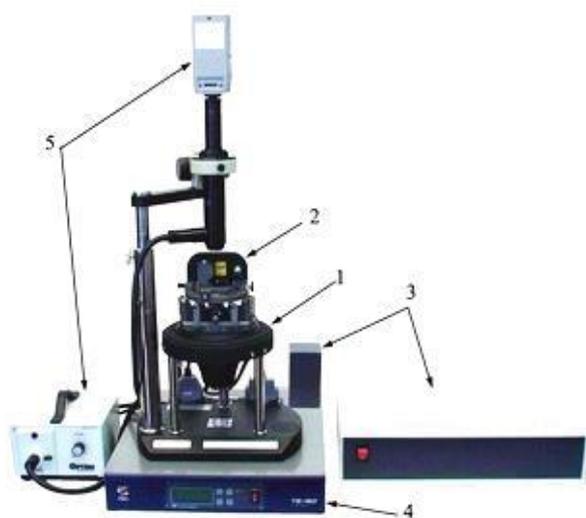
- 1) измерительный блок, включающий в себя блок подвода и сканирования, измерительную головку, сканер;
- 2) систему управления, состоящую из СЗМ контроллера, компьютер с интерфейсной платой, систему виброизоляции, эквивалент сканера, систему видеонаблюдения и защитный колпак.

Измерительная головка (рис. 3.18, б) содержит оптическую систему регистрации изгибов кантилевера, включающую в себя лазер и четырехсекционный фотодиод, и юстировочный столик.

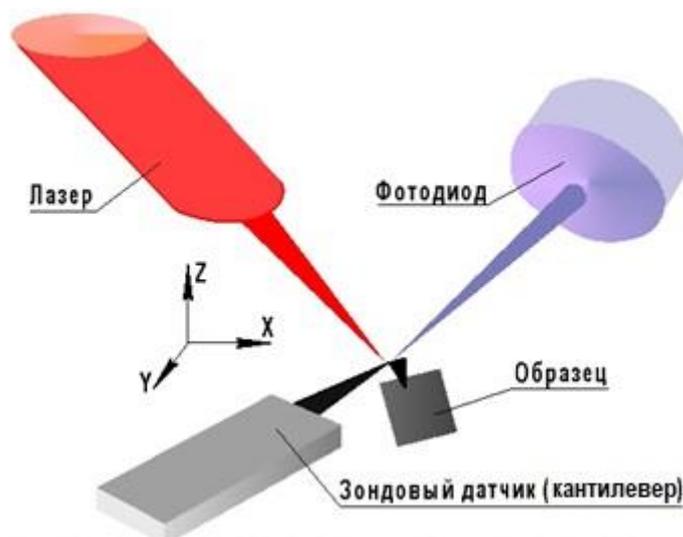
Винты XU перемещений столика служат для наведения лазерного луча на кантилевер. С их помощью кантилевер устанавливают в положение, когда лазерный луч попадает на его кончик. С помощью винтов позиционирования фотодиода четырехсекционный фотодиод перемещают таким образом, чтобы отраженный от кантилевера луч лазера попал точно в центр фотодиода. При этом, диапазон позиционирования по осям XU составляет 5×5 мм. Точность позиционирования – 5 мкм.

Для изучения деформационного рельефа поверхности стали 45 и Армко-железа до и после ППД МР-роликом использовали режим «Контактный Метод Рассогласования» (*DFL*).

Следует отметить, что рабочая зона кантилевера прибора имеет размеры ~ 10 нм, а характерное расстояние между зондом и поверхностью образца в атомно-силовом микроскопе по порядку величин составляет 0,1 – 10 нм. Таким образом, использование *V*-образных *NSG10* (фирмы *NT-DMT*) кантилеверов, с резонансной частотой 240 кГц, пирамидальными зондами, у которых отношение высоты зонда к ширине основания 3:1, а радиус закругления конца <10 нм и отношение высоты зонда к ширине основания 1:1, а радиус закругления конца <50 нм, позволило получить топографию поверхности с довольно высоким разрешением для обоих методов.



а)



б)

Рисунок 3.18 Атомный силовой микроскоп *Solver PH47-PRO*: а) основные функциональные устройства микроскопа: 1 - блок подвода и сканирования, 2 - измерительная головка, 3 - блоки управления, 4 - виброизолирующая платформа, 5 - система видеонаблюдения; б) схема устройства измерительной головки

«Контактный Метод Рассогласования» (*DFL*) предназначен для более точного выявления деформационного рельефа поперечных сечений шлифов методом АСМ. Сочетание контактного режима с «Методом Рассогласования» позволило получить дополнительную информацию относительно рельефа поверхности.

Суть метода заключается в том, что в процессе сканирования текущее значение сигнала, связанного с изгибом кантилевера является сигналом рассогласования цепи обратной связи и содержит дополнительную информацию о рельефе поверхности.

Этот сигнал и используется для более точного воспроизведения рельефа. В итоге сигнал рассогласования слабо отображает гладкие особенности рельефа (зерна) и с высоким контрастом отображает резкие шероховатости (включения, границы зерен).

Стоит отметить, что сканирование поверхностного слоя образцов методом АСМ, производилось вблизи свободного края поверхности (рис. 3.19). Размер области сканирования при изучении деформационного рельефа изменялся в пределах от 25 до 50 мкм в зависимости от размера изучаемого объекта. Изображение поверхности в пределах одного скана строилось построчно по 255 линиям и оставалось постоянным для всех последующих изображений.

Рентгеноструктурный анализ (РСА) проводился как в упрочненной, так и в необработанной части образцов на дифрактометре ДРОН-3. Для получения рентгенограмм

применяли монохроматизированное CuK_{α} -излучение меди при ускоряющем напряжении 30 кВ и силе тока 5 мА.



а)



б)

Рисунок 3.19 Фото положения кантилевера относительно свободного края образца при исследовании методом АСМ: а) исследование поверхностного слоя после ППД МР-роликом; б) исследование пластического отпечатка после ППД МР-роликом

Запись интенсивности рассеянного рентгеновского излучения осуществлялась в режиме сканирования (по точкам) в угловом диапазоне 35° - 100° с шагом $0,05^{\circ}$ и фиксированным временем счета 5 с. Для фазового анализа использовалась стандартная база COD. Для определения величины физического уширения β дифракционных линий матричной фазы использовался метод аппроксимации [272-274].

Расчет областей когерентного рассеивания [273-274] осуществлялся по формуле Шеррера:

$$D = \lambda/\beta \times \cos\theta, \quad (3.3)$$

где λ – длина волны рентгеновского излучения (1.54178 Å); θ – положение дифракционного рефлекса (101); β – ширина на половине высоты дифракционного рефлекса.

Расчет микродисторсии решетки выполнили по формуле:

$$\varepsilon = \beta \times \text{ctg}\theta, \quad (3.4)$$

где θ – положение дифракционного рефлекса; β – ширина на половине высоты дифракционного рефлекса (202).

Измерение уровня остаточных напряжений II рода на дифрактограммах по линиям плоскостей α -железа [110] и [211] с учетом упругой деформации кристаллической решетки ($\Delta a/a$) и относительной микродеформацией решетки ε проводили в соответствии с методикой [273-274]:

$$\sigma_{II} = E \cdot (\Delta a/a) + E \cdot \beta \cdot \text{ctg}\theta, \quad (3.5)$$

где E – модуль Юнга, a – параметр кристаллической решетки.

3.7 Алгоритм статистической обработки экспериментальных данных

Статистическую обработку полученных экспериментальных данных проводили с применением программы «*Statistica*» с доверительной вероятностью 0,95.

Алгоритм статистической обработки экспериментальных данных включал: вычисление выборочных статистических характеристик; определение желаемых свойств выборочных характеристик; отсев грубых наблюдений; проверку гипотезы нормальности распределения; построение зависимостей методами линейного и нелинейного оценивания.

Цель предварительной обработки результатов измерений – получение эффективных и корректных оценок, используемых в дальнейшем для выполнения различных методов статистического анализа и построения эмпирических зависимостей.

С использованием программной системы «*Statistica*» [275.] выполнялись расчеты: характеристик положения центра группирования – средних или ожидаемых значений (математических ожиданий), средних арифметических и других; характеристик рассеяния относительно центра группирования – дисперсий, среднеквадратических отклонений и др.

Среднее арифметическое квадратов вычислялось по формуле (3.6):

$$x_{\text{cp}}^2 = \sum \frac{x_i^2 n_i}{n_i}, \quad (3.6)$$

где n_i - суммарные значения; x_i - середины интервалов, которые вычислялись по формуле (3.7):

$$x_i = \frac{a_{i-1} + a_i}{2}, \quad (3.7)$$

где a_{i-1} - левые границы интервалов; a_i - правые границы интервалов.

Выборочная дисперсия определялась по формуле (3.8):

$$D_B = x_{\text{cp}}^2 - (x_{\text{cp}})^2. \quad (3.8)$$

Средне квадратическое отклонение определялось по формуле 3.9:

$$\sigma_B = \sqrt{D_B}. \quad (3.9)$$

В работе использовались стандартные методы построения и первичного исследования вариационных рядов экспериментальных данных: группировка, ранжирование, дискретизация по частотам и частностям, построение полигонов, гистограмм и др. Распределение случайных величин оценивалось характеристиками, определяющими положение центра группирования случайной величины и ее рассеяние около этого центра.

Использование выборочного метода преследовало решение двух задач:

- 1) установление закона распределения изучаемой случайной величины и параметров этого распределения по данным выборки;
- 2) статистическую проверку гипотез.

В работе использовались, как правило, большие и представительные выборки при исследовании свойств материалов, режимов, параметров очагов деформации, размеров зёрен и границ зёрен, значений области когерентного рассеивания (ОКР), микродисторсии кристаллической решетки и др.

Отсев грубых наблюдений проводили, используя таблицы распределения Стьюдента.

С использованием множественной регрессии определяли взаимосвязи между несколькими независимыми переменными и зависимой переменной, т.е.:

- определение взаимосвязей между параметрами очага деформации;

- определение взаимосвязей между параметрами очага деформации и некоторым выделенным параметром качества поверхностного слоя;
- определение связей между механическими параметрами состояния поверхностного слоя и параметрами режима обработки;
- определение связей между деформационным рельефом, в том числе размерами зёрен, их границ и параметрами режима обработки;
- определение связей между межплоскостным расстоянием, области когерентного рассеивания, микродисторсии кристаллической решетки и параметрами режима обработки.

Поскольку параметры уравнения регрессии определяются по выборочным данным, то их статистические оценки содержат некоторые погрешности (ошибки выборки). Следовательно, величина результативного признака Y окажется с вероятностью γ в определенном интервале относительно значения, вычисленного по уравнению линейной регрессии $\bar{y}(x)$. В случае линейной регрессии доверительные границы, в пределах которых с заданной доверительной вероятностью γ будет находиться теоретическое значение результативного признака Y при значении факторного признака $X = x_0$, в определялись следующим образом (3.10):

$$\bar{y}_0 - t_\gamma S_{x_0} \leq Y \leq \bar{y}_0 + t_\gamma S_{x_0},$$

$$S_{x_0} = \frac{\sigma_{\text{рег}}}{\sqrt{n-2}} * \sqrt{1 + \frac{(x_0 - \bar{x})^2}{\sigma^2(X)}}, \quad (3.10)$$

$$\sigma_{\text{рег}} = \sigma_B(Y) * \sqrt{1 - r_{XY}^2},$$

где \bar{y}_0 - значение $\bar{y}(x)$ при $x = x_0$, t_γ - величина квантили (определяющаяся по таблице распределение Стьюдента с доверительной вероятностью γ и числом степеней свободы $k = n - 2$).

Проверка значимости уравнений регрессии (адекватности) проводилась по F-критерию Фишера. Средняя квадратическая ошибка распределений Фишера определялась по формуле 3.11:

$$\sigma(Z) = \frac{1}{\sqrt{n-3}} \quad (3.11)$$

Если отношение $z/\sigma(Z) > 3$ (при уровне значимости $\alpha = 0,01$), то найденный коэффициент корреляции статистически значим; в противном случае — статистически незначим. Величина z определялась по таблице значений распределения Фишера.

В случаях, когда линейная модель являлась неадекватной, использовалось нелинейное оценивание, являющееся обобщением методов множественной регрессии и дисперсионного анализа.

3.8 Выводы по главе 3

1. Разработана и обоснована общая программа и методики экспериментальных исследований, позволивших подтвердить выдвинутую научную гипотезу, доказать адекватность аналитических моделей, определить влияние режимов обработки поверхностным пластическим деформированием мультирадиусным роликом на формирование качества поверхностного слоя. Обоснован выбор стали 45 в качестве основного материала для исследований, что обусловлено, во-первых, ее широким применением в различных отраслях машиностроения, и, во-вторых, наличием большого объема экспериментальных результатов для данной стали, что позволило получаемые данные сопоставлять с результатами других авторов. Выбор пластичного металла армко-железа обусловлен важностью понимания особенностей протекания процессов пластической деформации на зеренном, субзеренном, мезо- и макромасштабном уровнях, а также подтверждения корректности разработанной феноменологической модели.

2. Обосновано применение двух типов конструкций мультирадиусного ролика. Отличительными особенностями МР-ролика типа 1 от типа 2 является следующее: 1) для МР-ролика (тип 1) выбраны наименьшие значения действительных натягов (от 0,01 до 0,05 мм) и наибольшие расстояния в осевом направлении между вершинами ДЭ (от 3,49 до 4,43 мм); 2) для МР-ролика (тип 2) выбраны наибольшие значения действительных натягов (от 0,05 до 0,15 мм) и наименьшие расстояния в осевом направлении между вершинами деформирующих элементов (от 1,84 до 3,2 мм). Это позволило в процессах экспериментальных исследований создавать различные схемы напряженно-деформированного состояния с развитием очагов деформации в направлении подачи и в

глубину деформированного поверхностного слоя.

3. Дано обоснование применения современных средств технологического оснащения, включая: токарный станок с ЧПУ с системой *NC-201*; специальное однороликовое приспособление для обкатывания; комбинированный отрезной станок *Discotom-6*; автоматический электрогидравлический пресс *CitoPress-1*; шлифовально-полировальный станок *Tegramin-25*; профилограф-профилометр «*Talysurf-5M*»; микротвердомер *DuraScan 20*; оптический микроскоп отраженного света «*Neophot-21*»; атомно-силовой микроскоп *SolverPH47-PRO*; дифрактометр ДРОН-3 и другие.

4. В соответствии с адаптированной для МР-ролика методикой обработки предложено проведение 4-х серий экспериментов с различными режимами: 1-ая серия – статическое радиальное внедрение с усилием 3000 Н без вращения детали; 2-ая серия – радиальное внедрение МР-ролика при вращении детали с 630 об/мин и варьированием усилия от 185 до 395 Н; 3-ая серия экспериментов заключалась в создании стационарного очага деформации при обработке МР-роликом (по режимам в которых усилие варьировалось от 1700 до 4750 Н; частота вращения – от 630 до 800 об/мин, а подача – от 0,05 до 0,07 мм/об); 4-ая серия экспериментов заключалась в отделочно-упрочняющей обработке цилиндрических и кольцевых образцов из стали 45 и арможелеза МР-роликом по режимам, в которых усилие варьировалось от 800 до 4750 Н, частота вращения – от 630 до 1000 об/мин, а подача – от 0,05 до 0,1 мм/об).

5. Впервые разработаны и обоснованы методики исследования геометрических параметров очага деформации на разных стадиях нагружения поверхностного слоя (при статическом вдавливании (1-ая серия), вдавливании без подачи (2-ая серия) и при обработке МР-роликом и создании стационарного очага деформации (3-4 серии). Особенности методик являются возможность: получения стационарных очагов деформации за счет специальной оснастки и выбора режимов быстрого отвода деформирующего инструмента от поверхности детали; создания слепков и получения геометрии очагов деформации в зависимости от режима нагружения. Результаты исследований составили новую базу данных для формирования начальных и граничных условий при решении теоретических задач обработки МР-роликом.

6. Впервые адаптирована методика исследования упрочнения поверхностного слоя с учетом специфической геометрии МР-ролика. Исследования микротвердости по осевым и радиальным сечениям очага деформации позволило выполнить анализ

экспериментальной картины пластического течения металла, выявить зоны перекрытия очагов деформации, что, в свою очередь дало достаточно полное представление о процессе ППД МР-роликом.

7. Адаптированы к решаемым задачам методики: исследования микрогеометрии (шероховатости и волнистости), пробоподготовки шлифов, упрочнения, выполнения исследований методами оптической (ОМ) и атомно-силовой микроскопии (АСМ) и рентгеноструктурного анализа (РСА) в зависимости от режимов обрабатываемых деталей, что в результате позволило подтвердить выдвинутую научную гипотезу и оценить адекватность аналитической модели.

8. Предложена методика проведения статистического анализа, позволяющая вычислять выборочные статистические характеристики, выполнять отсев грубых наблюдений, проводить проверку гипотезы нормальности распределения и выполнять построение зависимостей методами линейного и нелинейного оценивания.

9. Разработанные методики позволяют проводить локальные, в том числе, в цеховых условиях, исследования при реализации технологического процесса ППД МР-роликом.

ГЛАВА 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ПОСЛЕ ППД МР-РОЛИКОМ

Экспериментальные исследования проводились в соответствии с методикой, изложенной в главе 3.

Задачи экспериментальных исследований: исследование геометрических параметров очагов деформации и формирование комплекса граничных условий для решения задач механики ППД МР-роликом; формирование экспериментальных данных для разработки феноменологической модели и проверки адекватности конечно-элементной модели процесса; исследование влияния режимов обработки на параметры качества поверхностного слоя; формирование экспериментальных данных для разработки технологии обработки мультирадиусным инструментом.

4.1 Исследования формирования очага деформации при ППД МР-роликом

Как было отмечено в главе 2, геометрические параметры очага деформации являются носителями наследственной информации о процессах, происходящих в поверхностном слое детали во время обработки, а также составляют совокупность начальных и граничных условий для решения задач механики ППД МР-роликом.

Данный блок исследований позволил уточнить последовательность внедрения инденторов МР-ролика и характер пластического течения металла.

Были проведены исследования очагов деформации для схем:

- статического внедрения МР-ролика (при выключенной подаче и оборотах станка);
- статического внедрения МР-ролика при вращении образца;
- обработки МР-роликом образца на длину, достаточную для получения стационарного очага деформации.

4.1.1 Исследование геометрии очага деформации при статическом внедрении МР-ролика (при выключенной подаче и оборотах станка)

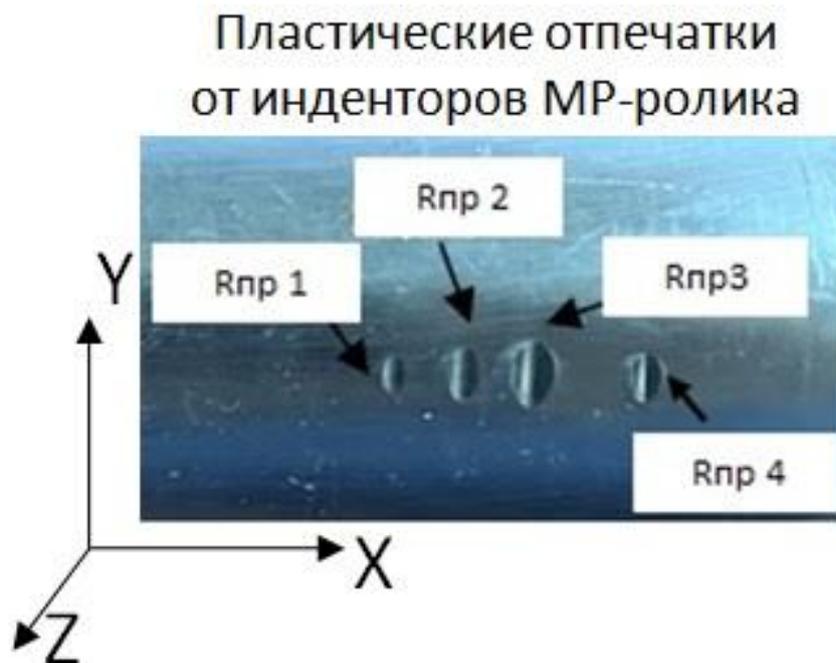
Как известно, формирование микрорельефа при ППД роликом в значительной степени определяется кинетикой течения металла в зоне пластической деформации, при этом упругопластическая деформация происходит как по всей поверхности контакта ролика с деталью, так и вокруг площадки контакта, которая в зависимости от геометрии инструмента может иметь различную форму и различные геометрические параметры.

На рисунке 4.1(а) представлено фото контуров площадок контакта от МР-ролика при статическом внедрении с усилием 3000 Н (при выключенных подаче и вращении детали) по методике представленной в подразделе 3.3.1. Из рисунка 4.1 (а) видно, что полученные контуры площадок контакта имеют эллиптическую форму.

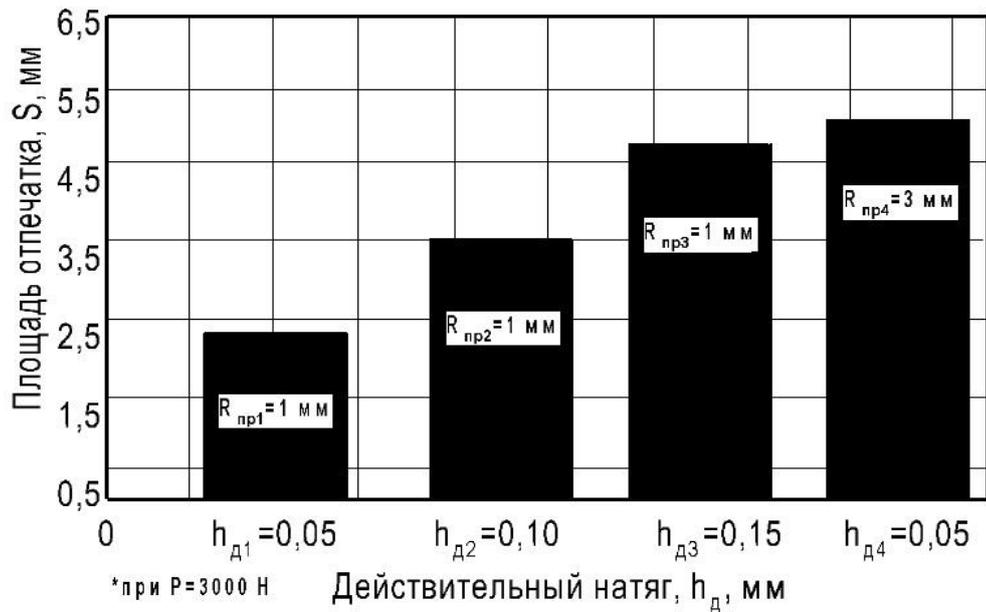
Стоит отметить, что под деформирующими инденторами МР-ролика ($R_{пр1}$, $R_{пр2}$, $R_{пр3}$, $R_{пр4}$) образуются 4 осесимметричных очага деформации криволинейной формы, а также пластические волны, расположенные в задней и передних частях деформирующих инденторов (рис. 4.1, в):

- 1) осесимметричный очаг деформации 1 (ОД₁), $A_1B_1C_1D_1E_1F_1$ от $R_{пр1}$;
- 2) осесимметричный очаг деформации 2 (ОД₂), $A_2B_2C_2D_2E_2F_2$ от $R_{пр2}$;
- 3) осесимметричный очаг деформации 3 (ОД₃), $A_3B_3C_3D_3E_3F_3$ от $R_{пр3}$;
- 4) осесимметричный очаг деформации 4 (ОД₄), $A_4B_4C_4D_4E_4F_4$ от $R_{пр4}$.

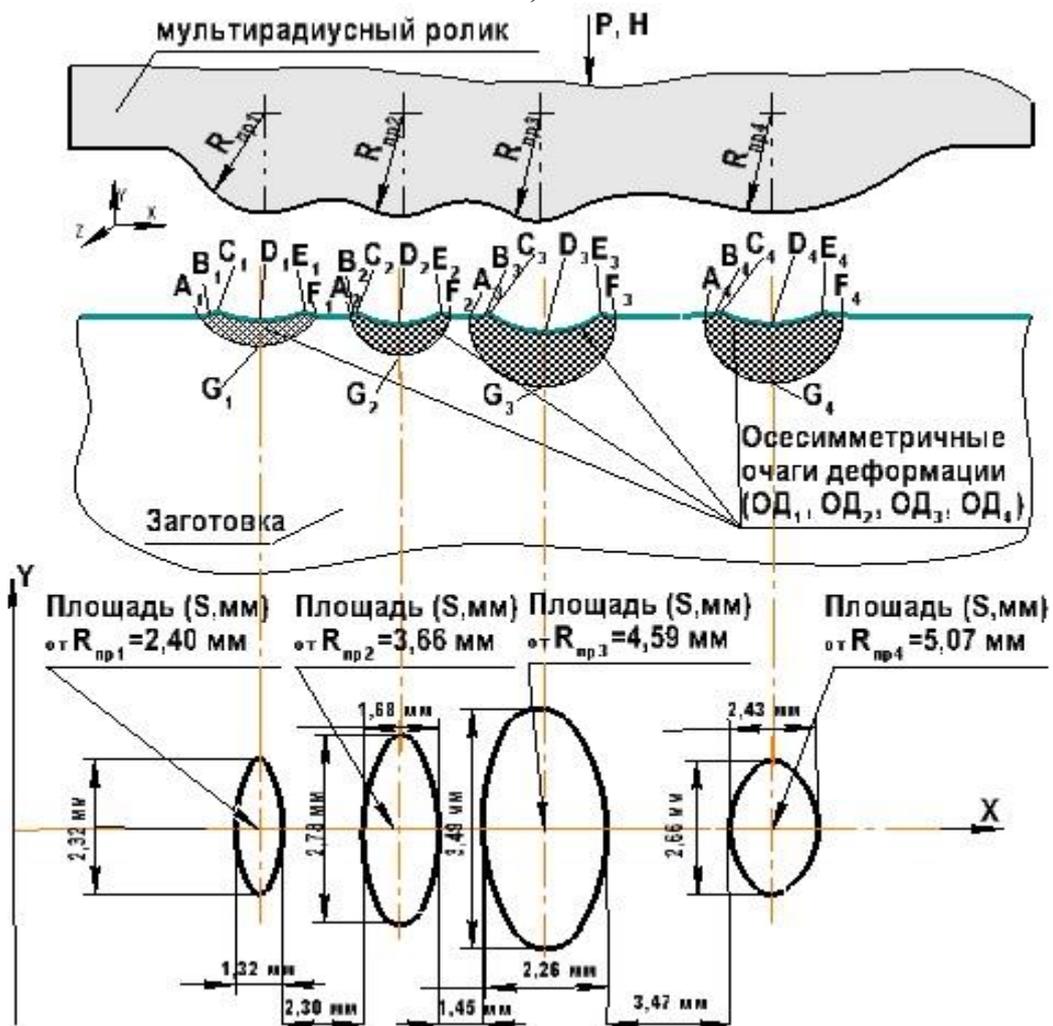
Анализ картины внедрения показал, что вначале внедряется индентор с наибольшим натягом 0,15 мм $R_{пр3}$, затем внедряется индентор со следующим по величине натягом 0,10 мм $R_{пр2}$, далее почти одновременно наблюдается внедрение инденторов с наименьшими натягами (0,05 мм) - сначала малый индентор $R_{пр1}$, затем наибольший индентор $R_{пр4}$. При внедрении инденторов: $R_{пр1}$, $R_{пр2}$, $R_{пр3}$, можно сказать, что с увеличением действительного натяга, увеличивается площадь контакта отпечатка (до 4,59 мм).



а)



б)



в)

Рисунок 4. Геометрия пластических отпечатков при радиальном внедрении МР-ролика без вращения детали: а) Фото отпечатков от МР-ролика; б) Зависимость площади контакта отпечатка от действительного натяга; в) Схема формирования контуров площадок контакта МР-ролика с неподвижной деталью и формы очагов деформации в меридиональном сечении

Наибольшая площадь пластического отпечатка (5,07 мм) локализуется под наибольшим индентором $R_{пр4}$. Стоит отметить, что не смотря на значительные действительные натяги (до 0,15 мм) и интенсивного режима внедрения (300 Н) МР-ролика, следов разрушения на поверхности образца обнаружено не было. Известно, что давление в очаге деформации является обобщающей характеристикой прикладываемой нагрузки и геометрии рабочего профиля деформирующего инструмента к обрабатываемой детали. Именно давление в ОД связывает конструктивно-технологические параметры обработки ППД МР-роликом с глубиной и степенью упрочнения.

Эллиптическая площадка контакта (рис. 4.1) является одной из наиболее благоприятной для распределения остаточных напряжений в очаге деформации. Давление (p_0) в центре эллипса (максимальное давление) определяется формулой 4.1 [127]:

$$p_0 = \frac{3}{2} \frac{P}{\pi ab}, \quad (4.1)$$

где P – усилие = 3000 Н; a, b – полуоси эллипса, мм.

Зная давления в очаге деформации и свойства стали 45 можно определить глубину упрочнения (табл. 1.1).

Таблица 4.1 Параметры пластических отпечатков, при радиальном внедрении МР-ролика с усилием 3000 Н, без вращения детали

Пластический отпечаток от индентора	Площадь отпечатка, S , мм	Давление в центре эллипса, МПа	Глубина внедрения индентора, мм	Предполагаемая глубина упрочнения, мм
$R_{пр1} = 1\text{мм}$	2,40	1875	0,15	4,4
$R_{пр2} = 1\text{мм}$	3,66	1229,5	0,20	4,2
$R_{пр3} = 1\text{мм}$	4,59	726,97	0,24	3,9
$R_{пр4} = 3\text{мм}$	5,07	886,5	0,12	4,0

Таким образом, расхождение экспериментальных и теоретических значений глубины упрочненного поверхностного слоя не превышает 15 %.

При этом, получены размерные соотношения величины контуров площадок контакта и выявлены четыре осесимметричных очага деформации с пластическими волнами в передней и задней контактной поверхности четырех деформирующих инденторов МР-ролика. В дальнейшем полученные данные помогут более точно анализировать пластическое течение металла при радиальном внедрении МР-ролика при вращении детали.

4.1.2 Исследование геометрии очага деформации при статическом внедрении МР-ролика при вращении образца

Согласно методике приведенной в подразделе 3.3.2, при статическом внедрении МР-ролика (с выключенной подачей и включенным вращением заготовки) установлена последовательность работы деформирующих элементов, а также особенности изменения ранее полученных форм контуров площадок контакта, а также контактных и внеконтактных зон очагов деформации.

Установлено, что и для образца из армко-железа, и для образца из стали 45 последовательность внедрения профильных радиусов ($R_{\text{пр1}}$, $R_{\text{пр2}}$, $R_{\text{пр3}}$, $R_{\text{пр4}}$) в ПС детали при внедрении и последующем отводе ролика, будет следующей (рис. 4.2):

1. Первым входящим в ПС детали будет третий индентор $R_{\text{пр3}} = 1$ мм с наибольшим натягом ($h_{\text{д3}} = 0,15$ мм).
2. Вторым входящим в ПС детали будет второй индентор $R_{\text{пр2}} = 1$ мм с натягом ($h_{\text{д2}} = 0,1$ мм).
3. Третьим входящим в ПС детали будет первый индентор $R_{\text{пр1}} = 1$ мм с натягом ($h_{\text{д1}} = 0,05$ мм).
4. Четвертым входящим в ПС детали будет четвертый индентор $R_{\text{пр4}} = 3$ мм с натягом ($h_{\text{д4}} = 0,05$ мм).

Анализ картины внедрения показал, что как только первый входящий в контакт с поверхностью индентор $R_{\text{пр3}}$ внедряется на 0,05 мм, в контакт с поверхностью вступает индентор $R_{\text{пр2}}$ на 0,05 мм, затем индентор $R_{\text{пр1}}$.

В момент, когда индентор $R_{\text{пр3}}$ внедряется на 0,15 мм, в последнюю очередь в контакт с поверхностью вступает четвертый индентор $R_{\text{пр4}}$ на 0,05 мм.

На рисунке 4.3 представлена геометрия пластических отпечатков и характерные профили очагов деформации от последовательно внедренных деформирующих инденторов МР-ролика.

Из рисунка 4.3 видно, что при внедрении МР-ролика в ПС детали, от каждого из деформирующих элементов образуется асимметричный относительно профиля ролика очаг деформации с неравномерным объемом пластических зон, расположенных по разные стороны каждого деформирующего элемента МР-ролика.



а)

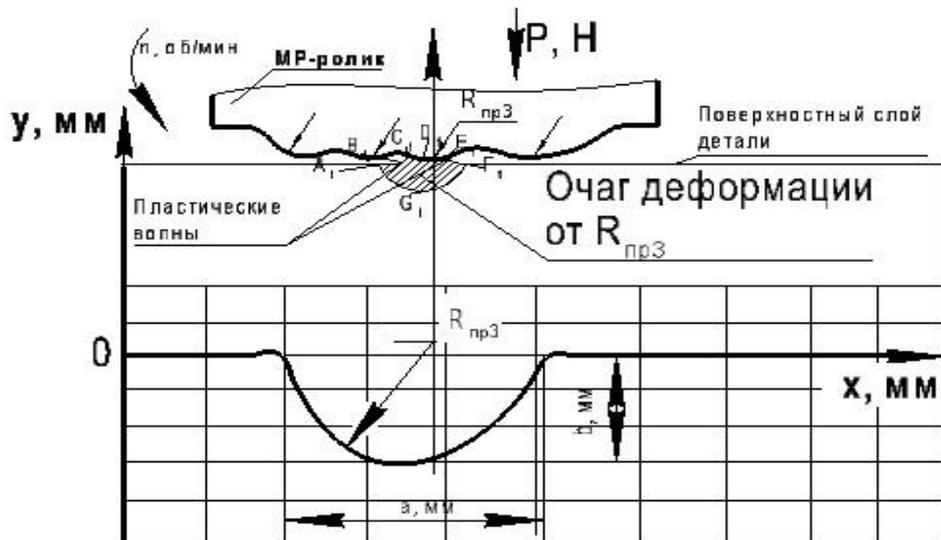


б)

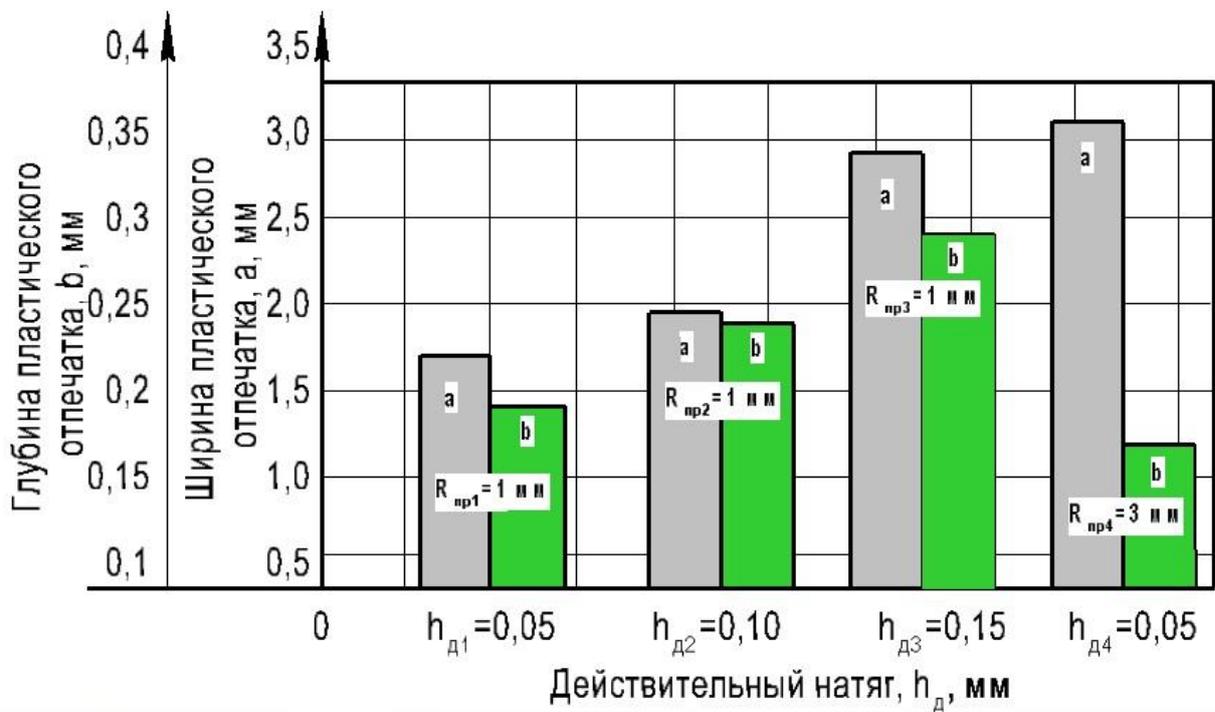
Рисунок 4.2 Фото образцов с пластическими отпечатками от последовательно внедренных деформирующих элементов МР-ролика при вращении детали:
а) образец из армко-железа; б) образец из стали 45

Согласно рассмотренному рисунку 4.3 изменяется не только форма ОД, но и геометрия пластических отпечатков от деформирующих инденторов МР-ролика.

Исходя рисунка 4.3 можно сказать, что с увеличением действительного натяга у малых деформирующих инденторов ($R_{пр1}$, $R_{пр2}$, $R_{пр3}$) возрастает длина контактной поверхности в направлении подачи, напряжения в области получаемых площадок контакта растут. При этом с увеличением профильного радиуса у четвертого, сглаживающего индентора $R_{пр4} = 3$ мм, площадка контакта увеличивается, но напряжения снижаются, соответственно, уменьшается высота пластической волны.



а)



б)

Рисунок 4.3 Геометрия контактной и внеконтактной поверхности пластических отпечатков и очагов деформации: а) Схема очага деформации и пластического отпечатка от $R_{пр3} = 1$ мм, $h_{д3} = 0,15$ мм; б) Зависимость глубины и ширины пластического отпечатка от действительного натяга инденторов МР-ролика

Таким образом, полученные результаты показывают, что при проектировании сложнопрофильного деформирующего инструмента для ППД, важно учитывать размеры формирующихся контактных и внеконтактных зон очага деформации. Кроме того, важно учитывать, усилие нагружения, которое оказывает влияние на размеры пластической волны, а, следовательно, и на качество поверхностного слоя.

4.1.3 Исследование геометрии очага деформации при обработке МР-роликом

Для исследования формирования очага деформации на стадии ППД МР-роликом проводились специальные экспериментальные исследования с последовательным обкатыванием гладких цилиндрических образцов по разным усилиям (табл. 4.1) и фиксацией возникающих очагов деформации (подраздел 3.3.3). Полученные форма и размеры ОД (рис.4.4, табл. 4.2) использовались в качестве граничных условий для конечно-элементного моделирования напряженно-деформированного состояния и создания феноменологической модели процесса ППД МР-роликом. Конечно-элементное моделирование проводилось по методике, изложенной в главе 2. Геометрические параметры полученных очагов деформации приведены в таблице 4.2.

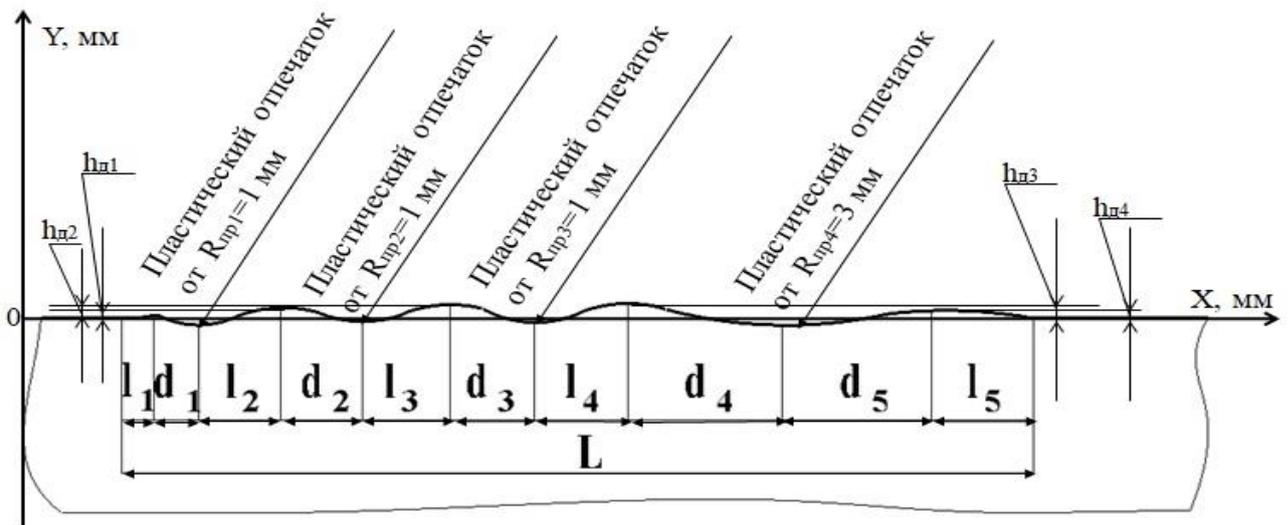


Рисунок 4.4 Схема условных обозначений геометрических параметров стационарного очага деформации от МР-ролика

Таблица 4.2 Геометрические параметры стационарного очага деформации для стали 45 от МР-ролика в зависимости от усилия обработки

Геометрические параметры стационарного очага деформации, мм														
l_1	d_1	l_2	d_2	l_3	d_3	l_4	d_4	l_5	d_5	L	$h_{д1}$	$h_{д2}$	$h_{д3}$	$h_{д4}$
Очаг деформации 1.1 (ОД 1.1), усилие $P=1700$ Н														
0,144	0,39	0,87	0,15	0,03	0,54	1,47	2,13	2,54	2,45	10,714	0,14	0,07	0,09	0,05
Очаг деформации 1.2 (ОД 1.2), усилие $P=2100$ Н														
0,178	0,45	0,99	0,28	0,07	0,65	1,54	2,15	2,61	2,78	11,698	0,15	0,10	0,17	0,08
Очаг деформации 1.3 (ОД 1.3), усилие $P=2500$ Н														
0,185	0,49	1,00	0,31	0,10	0,68	1,55	2,16	2,76	2,86	12,095	0,18	0,13	0,20	0,10
Очаг деформации 1.4 (ОД 1.4), усилие $P=2900$ Н														

0,18	0,58	1,52	0,39	0,14	0,69	1,70	2,14	2,89	2,88	13,11	0,19	0,18	0,24	0,11
Очаг деформации 1.5 (ОД 1.5), усилие $P=4750$ Н														
0,38	0,66	1,59	0,41	0,15	0,75	1,94	3,24	2,91	2,93	14,96	0,23	0,30	0,36	0,27

В результате конечно-элементного моделирования получали значения компонентов тензоров напряжений и деформаций в узлах конечно-элементной модели. Далее производился расчет значений параметров НДС, мгновенных и накопленных значений показателей механического состояния в точках линий тока (глава 2). На рис. 4.5 представлен профиль очага деформации, формирующийся при МКЭ-моделировании ППД МР-роликом. Из рисунка видно, профиль очага деформации полученный методом МКЭ (глава 2) с достоверностью свыше 85% совпадает с экспериментальным профилем очага деформации (ОД 1.1, табл. 4.2). Это говорит о корректности постановки и результатов МКЭ-модели, а также об адекватности разработанной ранее феноменологической модели.

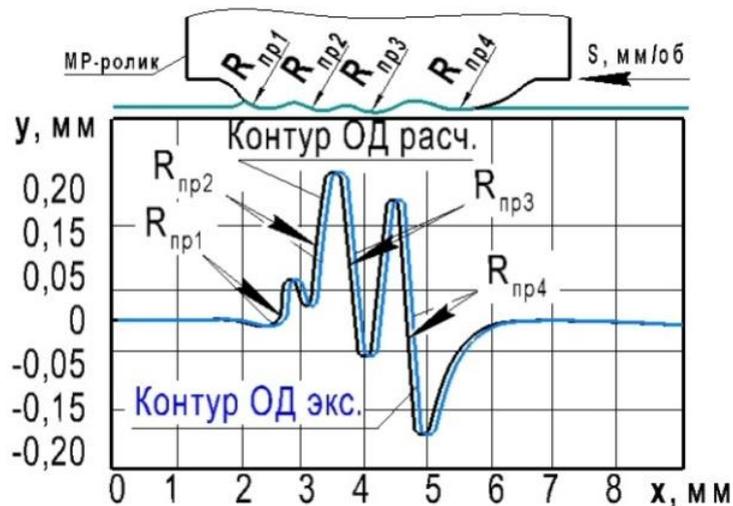


Рисунок 4.5 Схема формирования профиля очага деформации при МКЭ-моделировании процесса ППД МР-роликом (тип 2). Сопоставление расчетного и экспериментального профиля очагов деформации (ОД 1.1)

Анализируя геометрические параметры очагов деформации (табл. 4.2) и полученные МКЭ-моделирования (глава 2) можно сказать, что с увеличением усилия обкатывания, действительного натяга и уменьшением профильного радиуса и расстояния между инденторами МР-ролика, мы получаем более развитый очаг деформации с большей интенсивностью пластического течения металла и высоким гидростатическим давлением, локализующееся в свободных полостях МР-ролика. Полученные данные в дальнейшем будут положены в основу проектирования технологических процессов обработки ППД МР-роликом.

4.1.4 Сравнительный анализ аналитических результатов МКЭ-моделирования процесса ППД МР-роликом

Ранее (глава 2) были разработаны КЭ-модели, позволяющие установить особенности формирования напряженно-деформированного состояния в очаге деформации при ППД МР-роликом. Путем аналитических исследований (подраздел 2.3) были получены КЭ-модели процесса ППД МР-роликом с учетом разных действительных натягов для каждого из инденторов МР-ролика ($R_{пр1}$, $R_{пр2}$, $R_{пр3}$, $R_{пр4}$). Установлено, что в зависимости от величины натягов инденторов МР-ролика получаются разные схемы НДС в очаге деформации, каждая из которых характеризуется своими особенностями пластического течения металла. Так с уменьшением действительного натяга (h_d) на инденторы (МР-ролика), уменьшается очаг деформации. На рисунке 4.6 приведены контуры ОД для МР-роликов с разными натягами:

- для МР-ролика (тип 1) с натягами: $h_{д1} = 0,02$ мм; $h_{д2} = 0,05$ мм; $h_{д3} = 0,01$ мм; $h_{д4} = 0,02$ мм;
- для МР-ролика (тип 2) с натягами: $h_{д1} = 0,05$ мм; $h_{д2} = 0,1$ мм; $h_{д3} = 0,15$ мм; $h_{д4} = 0,05$ мм.

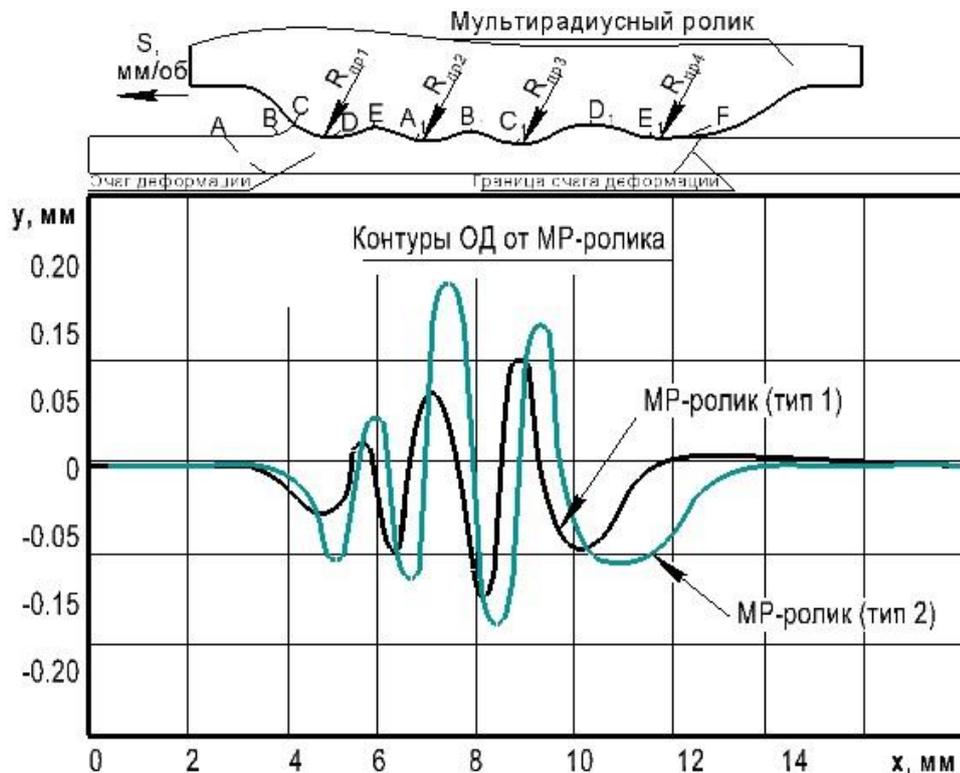


Рисунок 4.6 Контурсы очагов деформации от МР-ролика (тип 1) и МР-ролика (тип 2)

При обкатывании МР-роликом (тип 1 – с наименьшими натягами), высокое гидростатическое давление (σ) локализуется преимущественно в передних контактных и задних внеконтактных частях очага деформации ролика (рис. 4.7, а). Так, впереди $R_{пр1}$ значение гидростатического давления достигает до -800 МПа. Между $R_{пр1}$ и $R_{пр2}$ наблюдается наименьшее значение σ (до -420 МПа).

Пиковые значения σ локализуются впереди $R_{пр3}$ (до -1010 МПа), далее значения гидростатического давления снова снижаются до -450 МПа и возрастают до -1005 МПа впереди наибольшего радиуса $R_{пр4}$. Важно отметить, что все значения гидростатического давления со знаком минус.

Анализируя полученные данные можно сказать, что обработка МР-роликом (тип 2) приводит к созданию высокого гидростатического давления (более чем -2000 МПа), большего, чем обработка МР-роликом (тип 1), при которой гидростатическое давление достигает значений до -1010 МПа (рис. 4.7).

Так, между $R_{пр1}$ и $R_{пр2}$ можно наблюдать значения гидростатического давления до -1500 МПа, между $R_{пр2}$ и $R_{пр3}$ наблюдаются пиковые значения σ до -4010 МПа, между $R_{пр3}$ и $R_{пр4}$ также наблюдаются большие значения гидростатического давления до -3150 МПа. Стоит отметить, что при обработке МР-роликом с наибольшим натягом под инденторами: $R_{пр2}$, $R_{пр3}$ и $R_{пр4}$ можно наблюдать положительные значения σ , которые варьируются в пределах от 100 до 150 МПа.

Данное обстоятельство свидетельствует о смене знака с положительного на отрицательный, что в свою очередь говорит о возможности залечивания дефектов в металле. Несмотря на пиковые показатели гидростатического давления при обработке МР-роликом (тип 2), вследствие синхронных пиковых значений интенсивности касательных напряжений, показатель схемы напряженного состояния (рис. 4.8) является стабильным, что, в свою очередь, говорит о корректности полученных результатов.

Кроме того, анализируя показатель напряженного состояния (Π) для МР-ролика с меньшими натягами (тип 1) (рис. 4.8, а) можно сказать, что наибольшие значения также локализуются впереди малых инденторов: $R_{пр1}$, $R_{пр2}$, $R_{пр3}$ и варьируются в пределах от -0,5 до -0,7. Между инденторами также наблюдаются отрицательные значения (от -0,05 до -0,1).

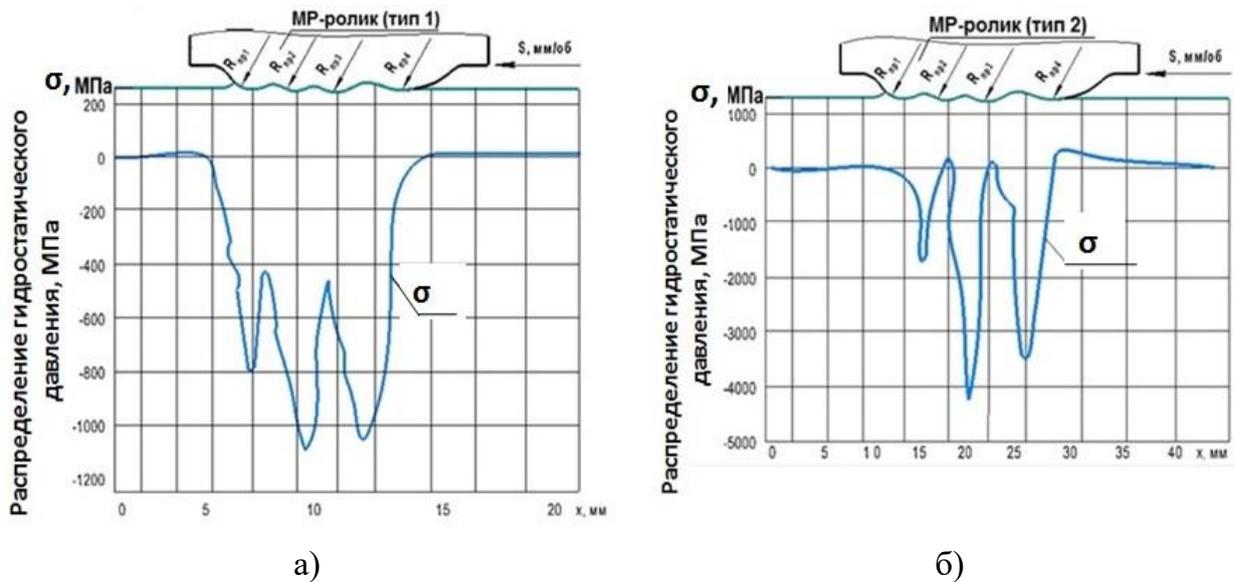


Рисунок 4.7 Схема распределения значений гидростатического давления (σ , МПа): а) для МР-ролика (тип 1); б) для МР-ролика (тип 2)

При обработке МР-роликом (тип 2) (рис. 4.8, б) можно наблюдать отрицательные значения Π (-0,6) впереди $R_{\text{пр}1}$, между $R_{\text{пр}1}$ и $R_{\text{пр}2}$ (до -0,8), между $R_{\text{пр}2}$ и $R_{\text{пр}3}$ (до -0,92), между $R_{\text{пр}3}$ и $R_{\text{пр}4}$ (до -0,82). Под инденторами $R_{\text{пр}1}$, $R_{\text{пр}2}$, $R_{\text{пр}3}$ показатель схемы напряженного состояния имеет положительные значения и варьируется в пределах от 0,41 до 0,45.

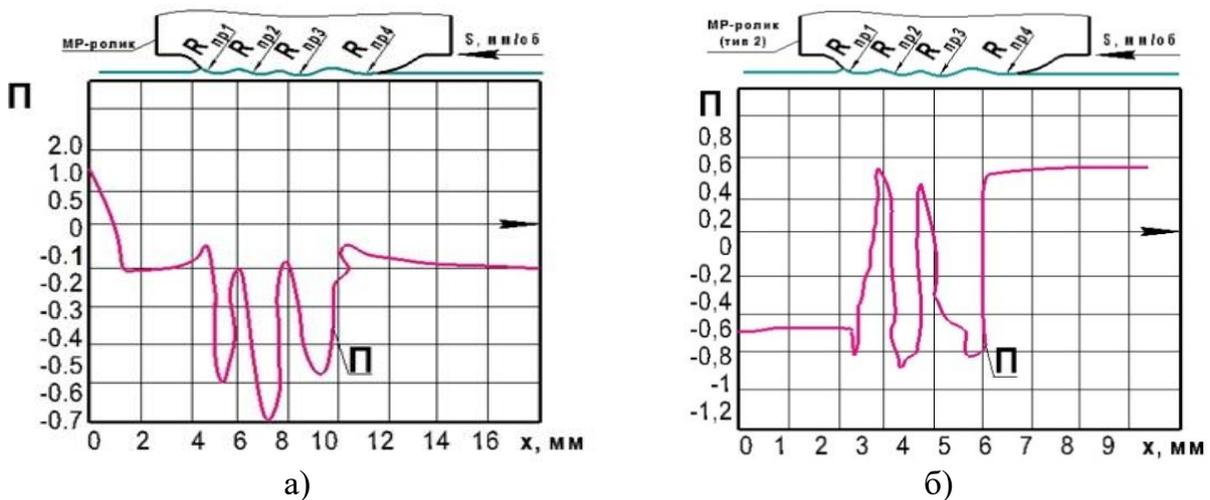


Рисунок 4.8 Распределение показателя схемы напряженного состояния Π для: а) МР-ролика (тип 1); б) МР-ролика (тип 2)

Показано, что варьированием величины действительных натягов МР-ролика возможно управление величиной и знаком напряжений в очаге деформации поверхностного слоя детали. Это дает возможность совершенствовать схемы ППД в направлении разработки новых деформирующих сложнопрофильных инструментов, которые имеют

определенные преимущества по сравнению с деформирующими инструментами традиционной торовой формы. Таким образом, проведены исследования влияния формы и размеров рабочей части МР-ролика на формирование очага деформации и напряженно-деформированное состояние.

В результате установлено, что более значительное влияние на величину очага деформации и значения гидростатического давления оказывают действительные натяги МР-ролика и расстояние между деформирующими инденторами, и менее - размеры деформирующих инденторов. Форма рабочего профиля МР-ролика способствует локализации гидростатического давления в свободных полостях МР-ролика.

Анализ построенных по КЭ-модели зависимостей (рис. 4.6-4.8) показывает, что при постоянном значении профильных радиусов ($R_{пр1}$, $R_{пр2}$, $R_{пр3}$, $R_{пр4}$) с увеличением значений действительных натягов (0,05-0,15 мм) и одновременном уменьшении расстояния между инденторами (1,86-3,2 мм) максимальные значения гидростатического давления возрастает (более чем -2000 МПа, рис. 4.7, б), а его локализация находится преимущественно в сводных полостях МР-ролика. Таким образом, анализ полученных данных показывает, что увеличение действительного натяга на инденторы МР-ролика (0,10-0,15 мм), увеличивается интенсивность пластического течения металла в очаге деформации, без разрушения поверхностного слоя детали. Уменьшение значений действительных натягов (0,01-0,05 мм) и увеличения расстояния между инденторами (3,49-4,43 мм) приводит к уменьшению значения гидростатического давления (до -910 МПа, рис. 4.7, а) и изменению его локализации (преимущественно под инденторами), что в свою очередь не позволяет регулировать интенсивность пластического течения металла. Кроме того, напряженно-деформированное состояние в очаге деформации становится более похожим на НДС, сформированное при обработке традиционным торовым инструментом. Близкое сходство наблюдается уже при значениях радиуса деформирующей поверхности не более 1,6 мм. Проведенные исследования позволили дать рекомендации по конструктивно-технологическим параметрам ППД МР-роликом.

Для создания интенсивного напряженно-деформированного состояния очага деформации с преимущественно высоким гидростатическим давлением, необходимо, чтобы соотношения геометрических параметров деформирующих инденторов изменялось в диапазоне $R_{пр} = 1..3$ мм, при этом последний индентор должен быть большего радиуса (2,5-3 мм), для того, чтобы выполнять сглаживающую рельеф функцию; расстояние

между деформирующими инденторами варьировалась в пределах от 1,8 до 3,2 мм; величина действительных натягов на инденторы изменялась в диапазоне от 0,05 до 0,15 мм. Полученные результаты исследований рекомендуется применять при проектировании сложнопрофильных деформирующих инструментов, используемых для поверхностного пластического деформирования.

4.2 Исследование влияния режимов обработки на шероховатость и волнистость поверхностного слоя

Исследование шероховатости поверхности проводилось в соответствии с методикой, представленной в главе 3.

Исходная шероховатость цилиндрических образцов из армко-железа составила:

- Ra , мкм (среднее арифметическое отклонение профиля) 0,76 мкм;
- $Rmax$, мкм (наибольшая высота неровностей профиля) 6,05 мкм.

Исходная шероховатость цилиндрических образцов из стали 45 составила:

- Ra , мкм (среднее арифметическое отклонение профиля) 0,70 мкм;
- $Rmax$, мкм (наибольшая высота неровностей профиля) 5,10 мкм.

Анализируя шероховатость и волнистость цилиндрических образцов из армко-железа после обкатывания МР-роликом (тип 2, с натягами: $h_{д1} = 0,05$ мм; $h_{д2} = 0,1$ мм; $h_{д3} = 0,15$ мм; $h_{д4} = 0,05$ мм.) и традиционными торовыми инструментами с профильными радиусами от 1,6 мм до 10 мм, можно сказать, что шероховатость образцов из армко-железа уменьшается с увеличением усилия обкатывания в пределах от 630 до 1200 Н, параметр Ra не превышает 0,45-0,5 мкм (рис. 4.9), волнистость ($Wmax$) варьируется в пределах от 45-35 мкм. При увеличении усилия обкатывания до 2700 Н наблюдается увеличение до Ra 0,45-0,53 мкм. Параметр $Rmax$ уменьшается более чем 3 раза (при исходной 6,05 мкм) (рис. 4.9), при усилении обкатывания 630-1200 Н. При увеличении усилия обкатывания до 2700 Н, $Rmax$ увеличивается до 3,10 мкм.

Было установлено, что наибольшее влияние на высотные параметры шероховатости оказывает величина действительного натяга МР-ролика (рис. 4.9). При действительном натяге $h_{д1,4} = 0,05$ мм Ra снижается до 0,20-0,23 мкм, при увеличении натяга до $h_{д2} = 0,1$ мм, параметр Ra изменяется в пределах от 0,33-0,35 мкм. При натяге $h_{д3} = 0,15$ мм наблюдается увеличение параметра Ra до 0,43-0,45 мкм.

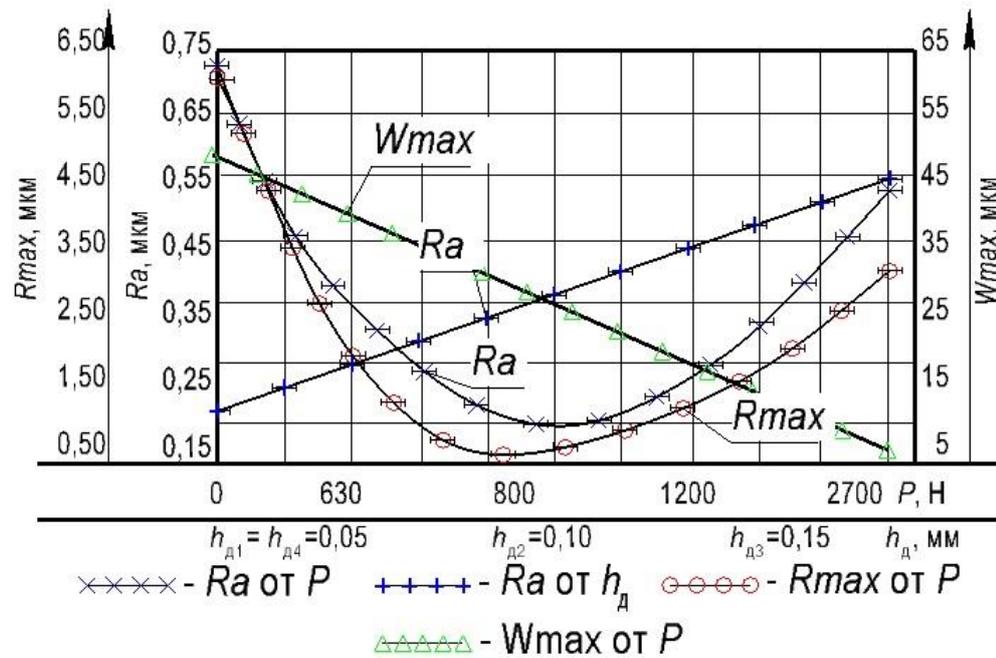


Рисунок 4.9 Экспериментальные значения параметров шероховатости образцов из армо-железа после ППД МР-роликом

Таким образом, анализируя полученные данные шероховатости (рис. 4.9) образцов, можно сказать, что ППД МР-роликом позволяет обкатывать образцы из такого не твердого материала, как армо-железо, при этом снижая шероховатость до 0,25-0,30 мкм и не разрушая поверхностный слой материала. Построенные зависимости (рис. 4.9) позволяют выбрать область рекомендуемых режимов обработки образцов из армо-железа и других не твердых материалов:

- усилие обкатывания (P , Н): 630-1200 Н;
- частота вращения шпинделя (n , об/мин): 630-800 об/мин;
- подача (S , мм/об): не превышает 0,03 мм/об;
- профильные радиуса МР-ролика ($R_{пр}$, мм): 1..3 мм, при этом последний ДЭ должен быть большего диаметра, для того, чтобы выполнять сглаживающую функцию;
- величина действительных натягов МР-ролика (h_d , мм): 0,05-0,15 мм;
- расстояние между инденторами МР-ролика (S_n , мм): 1,86...3,2 мм.

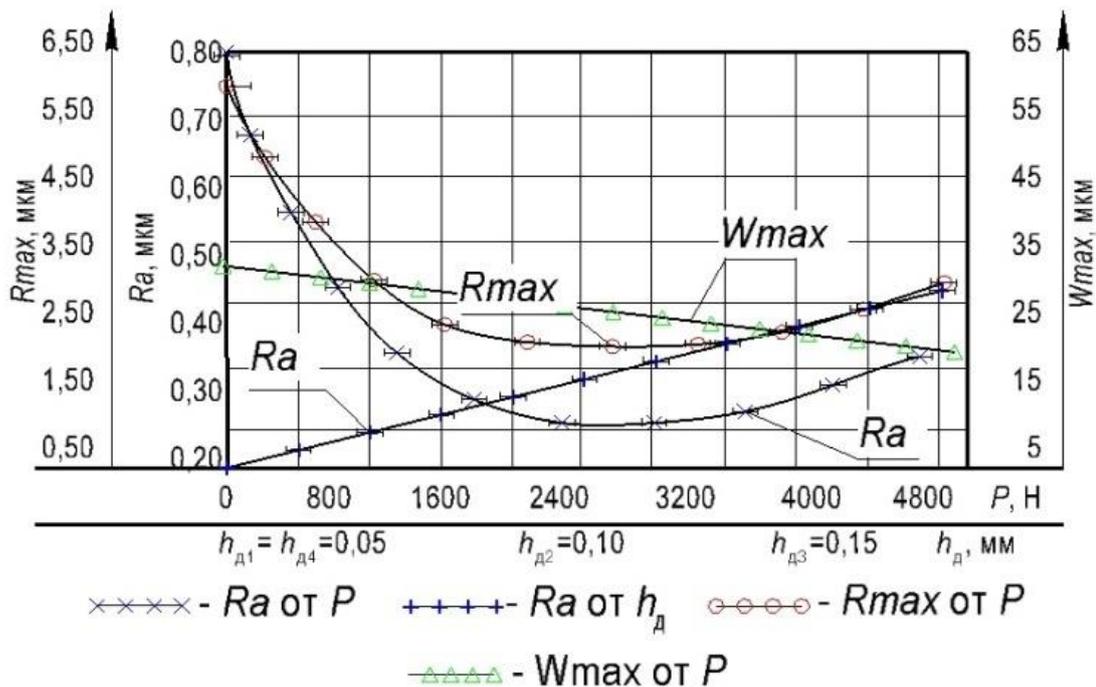
Анализируя шероховатость и волнистость цилиндрических образцов из стали 45 после обкатывания МР-роликом и традиционными торowymi инструментами с профильными радиусами от 1,6 мм до 10 мм, установлено, что обкатывание МР-роликом с наибольшими усилиями (P от 2500 Н до 4500 Н) приводит к значительному уменьшению шероховатости до 0,2-0,3 мкм при исходной шероховатости 0,70 мкм, волнистость

(W_{max}) поверхности варьируется в пределах 23-32 мкм. При этом параметр Ra при обкатывании с усилиями от 800 Н до 2000 Н не превышает 0,5-1,2 мкм (рис. 4.10). Наименьшее значение параметра R_{max} 0,75 можно наблюдать при обкатывании с усилием 3000 Н (рис. 4. 10).

Наибольшее влияние на высотные параметры шероховатости образцов из стали 45 оказывает величина действительного натяга МР-ролика (рис. 4. 10). Как и в случае обкатывания армко-железа, увеличение значений действительного натяга приводило к росту параметра Ra до 0,45-0,48 мкм (рис. 4. 10).

Известно, что при поверхностном пластическом деформировании формирование шероховатости поверхности определяется пластическим течением в очаге деформации. Экспериментальные результаты зависимости Ra от накопленной степени деформации сдвига (Λ) для очагов деформации ОД1.1-ОД 1.5 показаны на рисунке 4.10 (б). Для всех очагов деформации характерным является снижение шероховатости до некоторой степени Λ и, в дальнейшем, возрастание шероховатости, что подтверждает корректность принятой ранее модели.

Следует отметить, что для очагов деформации при различном усилии обкатывания различна интенсивность пластического течения металла. Так, для очагов деформации ОД 1.5, ОД 1.4, полученных при обработке с большими усилиями, минимум шероховатости достигается: для ОД 1.5 при $\Lambda=5,5$, для ОД 1.4 при $\Lambda=3,9$.



а)

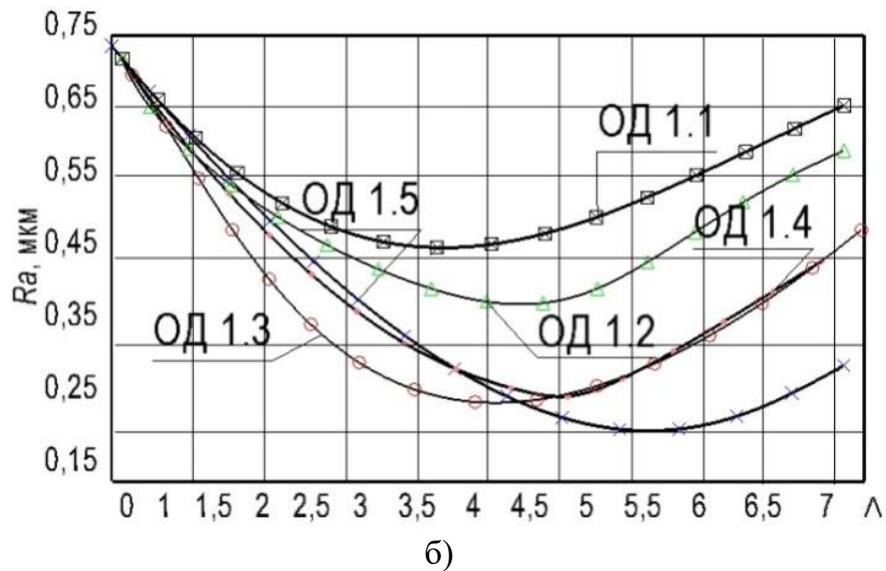


Рисунок 4.10 Экспериментальные значения параметров шероховатости образцов из стали 45 после ППД МР-роликом: а) зависимость R_a , R_{max} , W_{max} от усилия обкатывания, действительного натяга; б) зависимость R_a от накопленной степени деформации сдвига (Λ) для очагов деформации - ОД 1.1, усилие $P=1700$ Н; ОД 1.2, усилие $P=2100$ Н; ОД 1.3, усилие $P=2500$ Н; ОД 1.4, усилие $P=2900$ Н; ОД 1.5, усилие $P=4750$ Н

Зависимости параметров шероховатости R_a , R_{max} от усилия обкатывания выражаются следующими формулами (4.2-4.3):

$$R_a = 0,76 - 0,0003 \times P + 4,23 \times 10^{-8} \times P^2 \quad (4.2)$$

$$R_{max} = 5,93 - 0,0019 \times P + 2,37 \times 10^{-7} \times P^2 \quad (4.3)$$

Полученные значения параметров шероховатости сравнимы с аналогичными, получаемыми при обычных схемах ППД [82-83].

Построенные зависимости (рис. 4.10) позволяют выбрать область рекомендуемых режимов обработки образцов из стали 45:

- усилие обкатывания (P , Н): 2400-4750 Н. Важно учитывать, что при режимах ($P=3000$ -4750 Н), где при обкатывании МР-роликом в очаге деформации гидростатическое давление достигает высоких значений (более чем -2000 МПа) шероховатость поверхности R_a может достигать 0,25-0,29 мкм;
- частота вращения шпинделя (n , об/мин): 630 об/мин;
- подача (S , мм/об): не превышает 0,07 мм/об;
- профильные радиуса МР-ролика ($R_{пр}$, мм): 1..3 мм, при этом последний ДЭ должен быть большего диаметра, для того, чтобы выполнять сглаживающую функцию;
- величина действительных натягов МР-ролика (h_d , мм): 0,05-0,15 мм;
- расстояние между инденторами МР-ролика (S_n , мм): 1,86...3,2 мм.

Таким образом, шероховатость поверхности при ППД МР-роликом остается на достаточном для широкой номенклатуры деталей уровне.

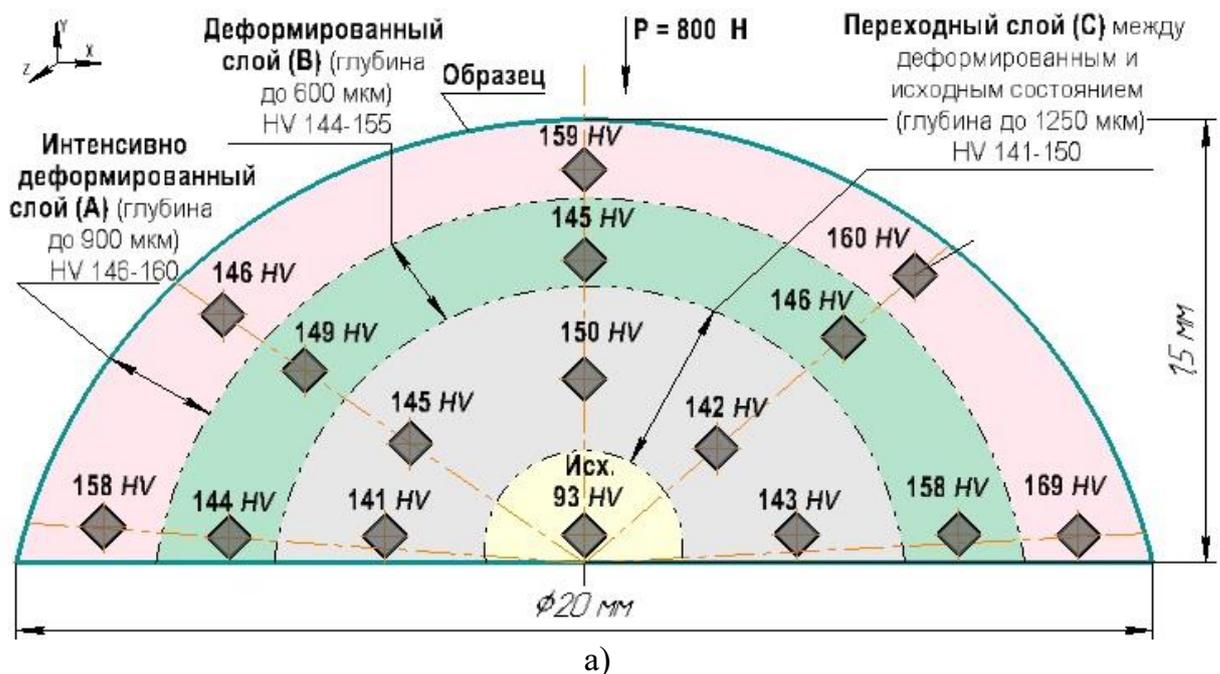
4.3 Исследование влияния режимов обработки на упрочнение поверхностного слоя

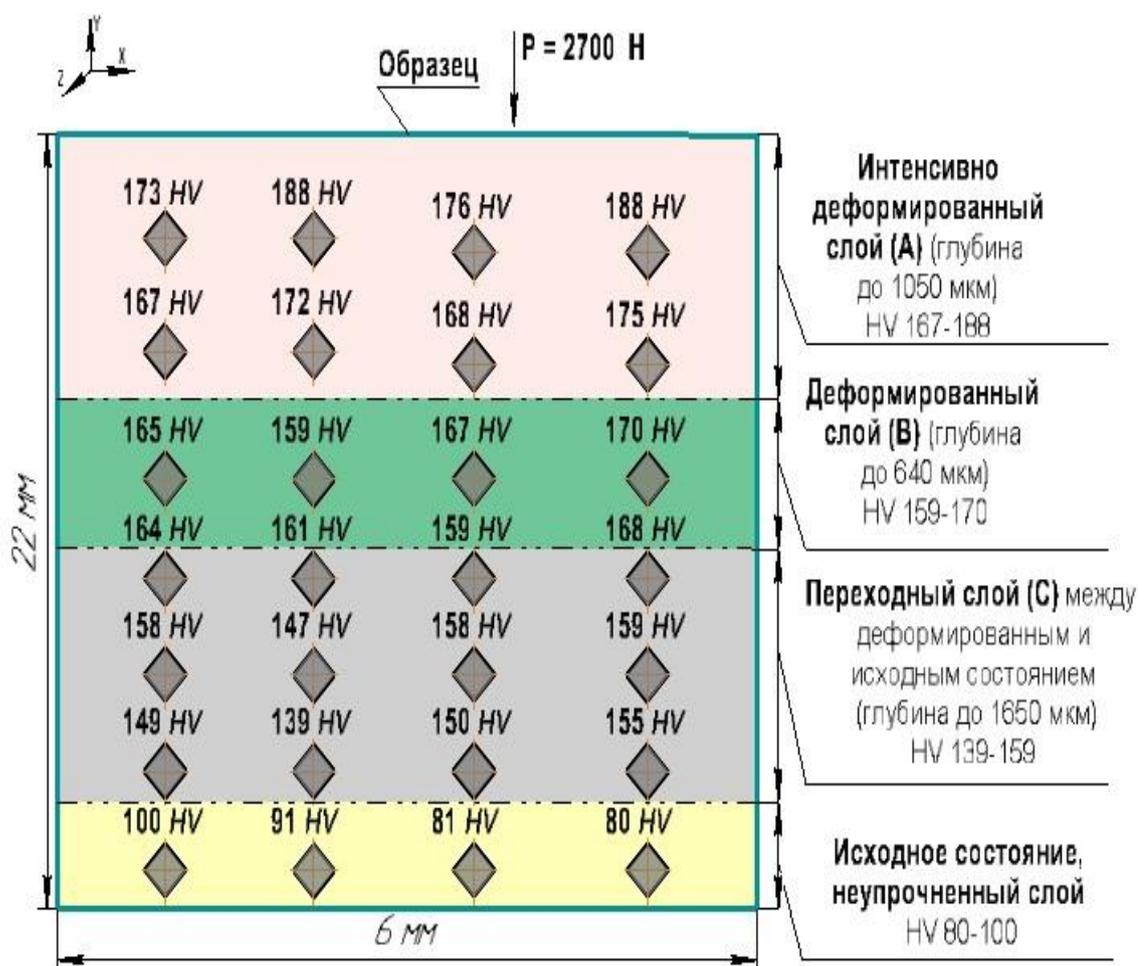
Исследование микротвердости и глубины упрочнения проходило в соответствии с методикой, изложенной в главе 3. В подразделе представлены результаты измерения микротвердости армко-железа и стали 45.

В связи с тем, что особенности измерения микротвердости армко-железа не отражены в существующем нормативном документе ГОСТ 9450, был проведен ряд измерений с разными нагрузками.

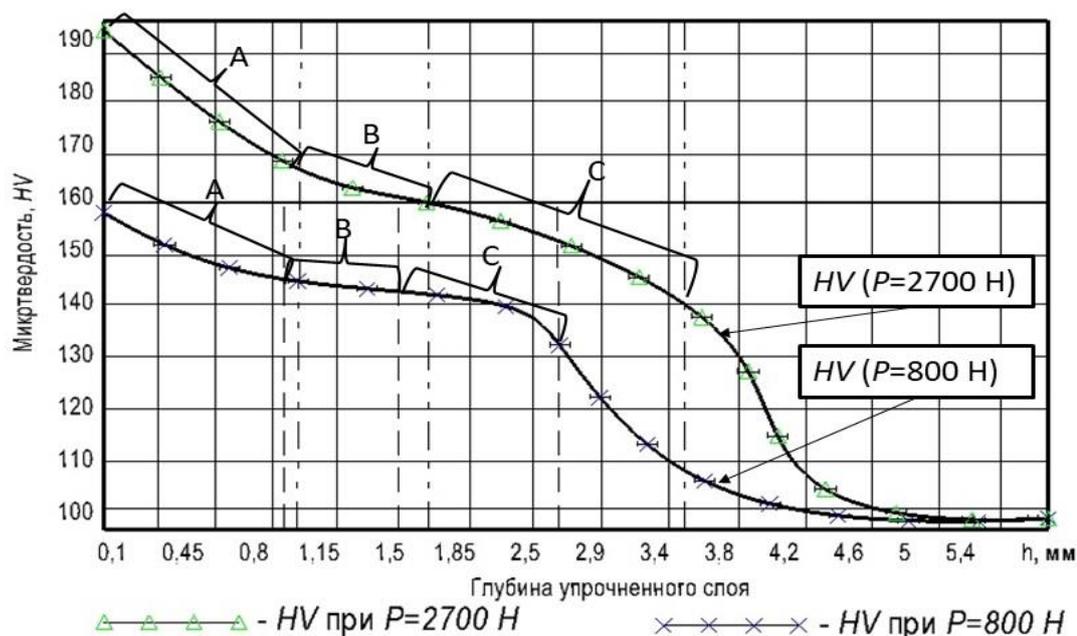
Установлено, что наибольшая точность измерений армко-железа обеспечивается при малой нагрузке ($HV\ 0,1$). С целью нивелирования погрешностей измерений, у боковой грани ранее полученного отпечатка расстояние между центрами последующих превышало размер диагонали более чем в 2,5 раза.

После ППД МР-роликом цилиндрического образца из армко-железа, обработанного с усилием 800 Н, установлено значительное увеличение микротвердости на глубине от 0,1 до 2750 мкм (до 144-160 HV) при исходной 90-93 HV . На рисунке 4.11, а, в представлены схема распределения средних значений микротвердости образца и график зависимости микротвердости от глубины упрочнения.





б)



в)

Рисунок 4.11 Экспериментальные значения параметров микротвердости образцов из армко-железа после ППД МР-роликом: а) схема распределения микротвердости образца, обработанного при усилии 800 Н; б) схема распределения микротвердости образца, обработанного при усилии 2700 Н; в) зависимость микротвердости от глубины упрочнения

После ППД МР-роликом цилиндрического образца из армко-железа, обработанного с наибольшим усилием (2700 Н), глубина упрочненного слоя достигала до 3340 мкм. Установлено значительное увеличение микротвердости на глубине от 0,1 до 1050 мкм (170-188 HV). На рисунке 4.11 (б, в) представлены схема распределения микротвердости образца и график зависимости микротвердости от глубины упрочнения.

Анализируя значения микротвердости по глубине упрочненных образцов из армко-железа (рис. 4.10, в), обработанных с усилиями 800 и 2700 Н, можно сказать, что для обоих образцов характерно наличие следующих трех деформированных областей:

1. Интенсивно деформированный слой (А), глубиной от 900 (для $P=800$ Н) до 1050 (для $P=2700$ Н) мкм, для которого характерны высокие значения микротвердости от 160 до 180 HV. Значительное упрочнение связано с особенностями границ зёрен, которые влияют на уровень микротвердости и имеют сильно вытянутую форму в направлении подачи инструмента.

2. Деформированный слой (В), глубиной от 600 до 640 мкм, для которого значения микротвердости варьируются в пределах от 144 до 170 HV.

3. Переходный слой, между деформированным и исходным состоянием (С), глубиной до 1650 мкм, для которого характерны небольшие значения микротвердости 139-159 HV.

Таким образом, анализируя полученные результаты можно сказать, что обработка МР-роликом образцов из армко-железа приводит к увеличению микротвердости в 1,5-2 раза.

После ППД МР-роликом образца из стали 45, обработанного с усилием 2500 Н, установлено значительное увеличение микротвердости не только в тонком ПС (глубина до 50 мкм), но и на глубине более 1710 мкм (рис.4.12). Анализ значений микротвердости в зоне пластических волн от инденторов МР-ролика, показал следующее: в зоне подъема и вершины пластической волны впереди первого индентора $R_{пр1} = 1$ мм (рис. 4.12, криволинейная линия ABC, сечение №1), а также в зоне позади наибольшего четвертого индентора $R_{пр4} = 3$ мм (рис. 4.12, зона после точки F, сечения №: 9, 10, 11) наблюдаются средние значения микротвердости 240-268 HV.

В зонах под вершинами инденторов МР-ролика: $R_{пр1}, R_{пр2}, R_{пр3}, R_{пр4}$ (рис. 4.12, точки: D, D₂, D₃, D₄, сечения №: 2, 4, 6, 8) значения микротвердости увеличиваются и варьируются в пределах от 240 до 311 HV.

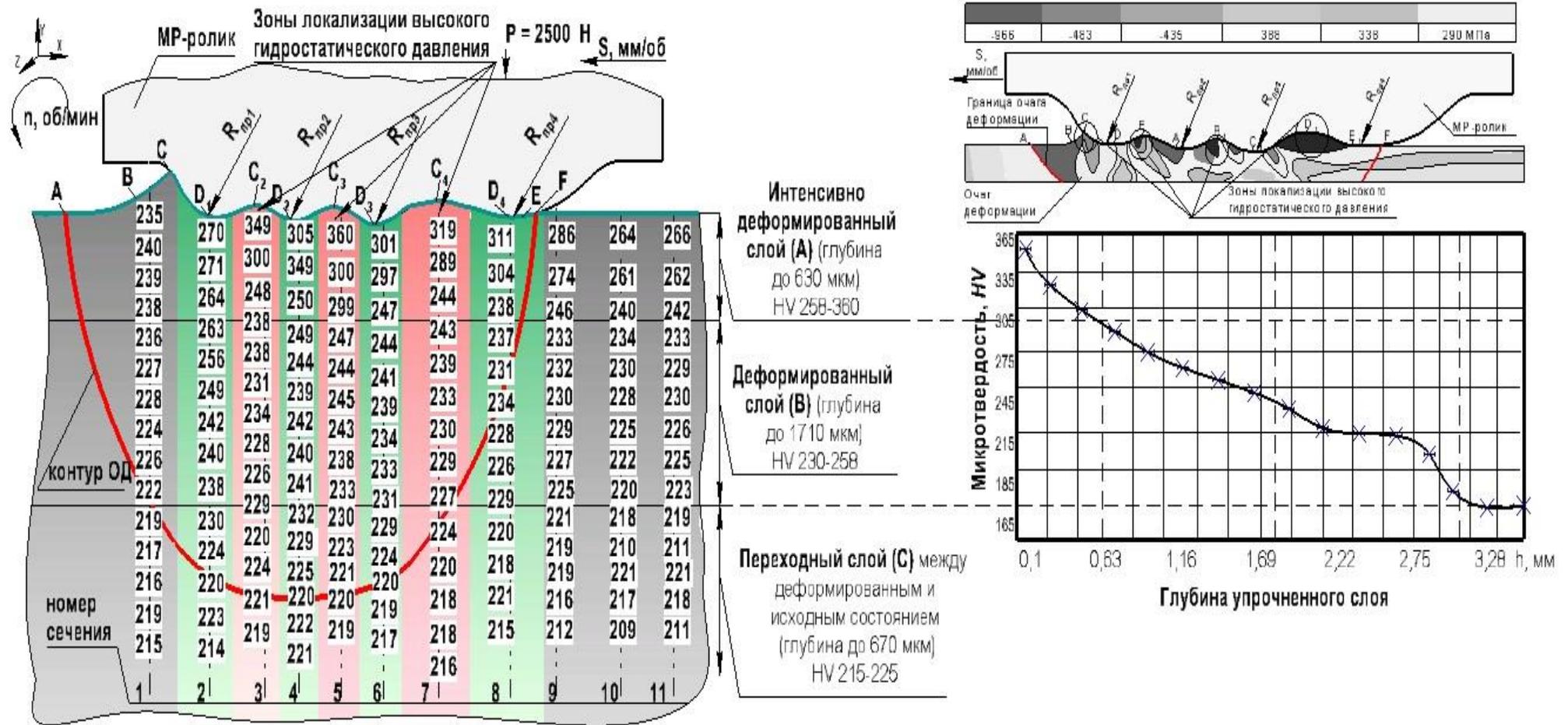


Рисунок 4.12 Экспериментальные значения микротвердости образцов из стали 45 после ППД MP-роликом, при усилии 2500 Н

Наибольшие значения микротвердости, можно наблюдать в зонах между инденторами, которые в процессе обработки заполняются металлом (рис. 4.12, точки: C_2 , C_3 , C_4 , сечения №: 3, 5, 7) и в которых преобладает высокое гидростатическое давление (до -900 МПа).

Значения микротвердости в данных областях варьируются в пределах от 249 до 360 HV. Анализируя полученные результаты, можно сказать, что при ППД МР-роликом наибольшее упрочнение можно наблюдать в зернах перлита (рис. 4.13).

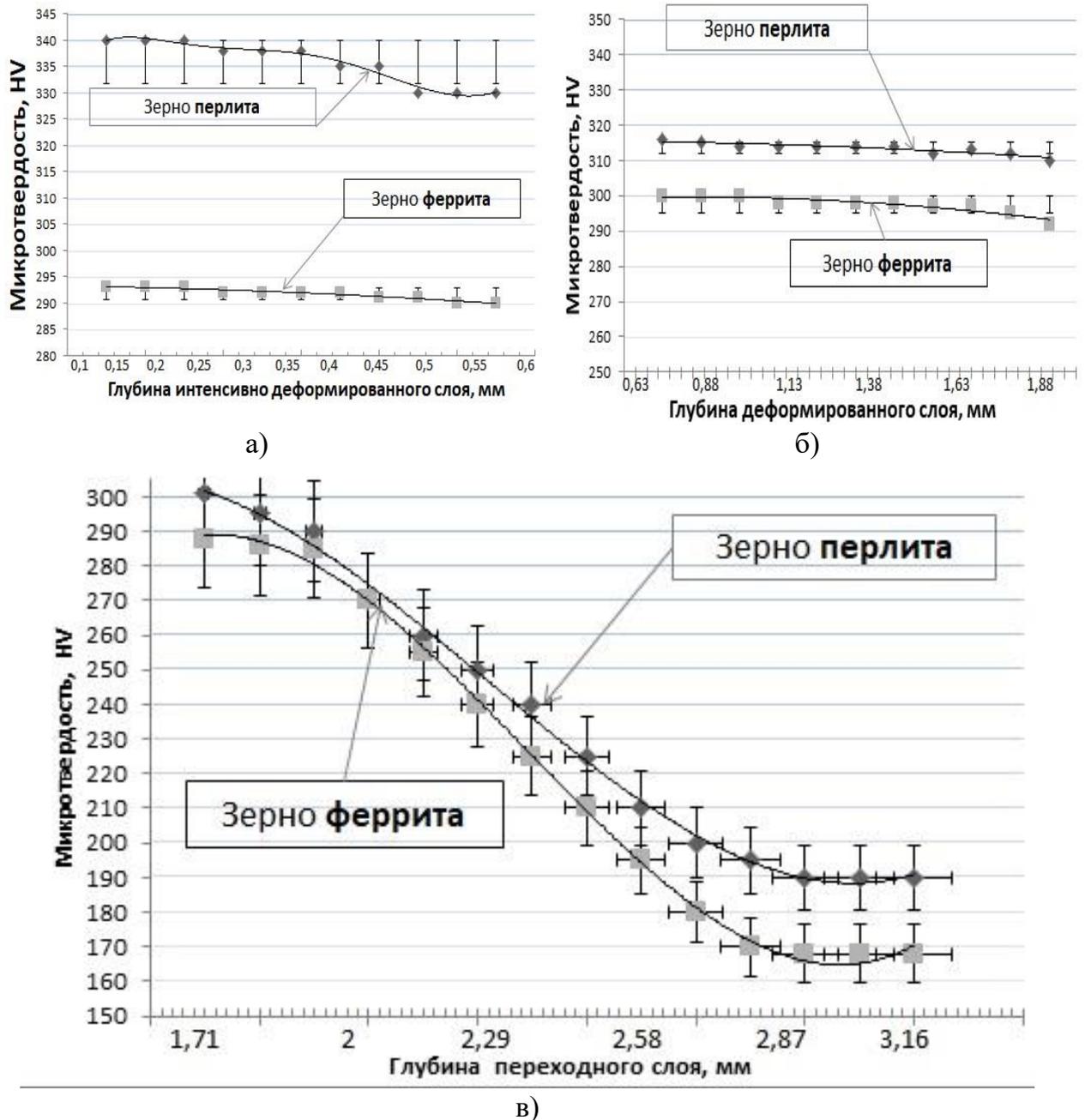


Рисунок 4.13 Экспериментальные значения микротвердости зёрен перлита и феррита (сталь 45) после ППД МР-роликом, при усилии 2500 Н: а) по глубине интенсивно деформированного слоя (630 мкм); б) по глубине деформированного слоя (1710 мкм); в) по глубине переходного слоя (670 мкм)

Анализируя полученные значения микротвердости по зернам феррита и перлита, можно сказать, что значительное упрочнение характерно для зерен перлита (до 330-340 *HV*) (рис. 4.13).

Накопление повреждений и дефектов будет происходить в менее упрочненной ферритной фазе в связи с тем, что она является наиболее пластичной и наименее прочной.

Анализируя полученные значения по глубине образца, можно сказать, что имеются участки, и в зернах перлита, и в зернах феррита, которые имеют высокие и низкие значения микротвердости.

После ППД МР-роликом образца из стали 45, обработанного с максимальным усилием 4750 Н, установлено значительное увеличение микротвердости не только в тонком ПС (глубина до 50 мкм), но и на глубине до 3400 мкм (рис.4.14).

Анализ значений микротвердости в зоне пластических волн от инденторов МР-ролика показал, что наибольшие значения микротвердости (до 445*HV*) можно наблюдать в зоне между инденторами $R_{пр3}$ и $R_{пр4}$; под наибольшим индентором $R_{пр4}$ и в зоне позади индентора $R_{пр4}$ (рис. 4.14, а точки: C_4 , D_4 сечения №: 7, 8, 9).

В зоне подъема и вершины пластической волны впереди первого индентора $R_{пр1} = 1$ мм (рис. 4.14, криволинейная линия *ABC*, сечение №1), значения микротвердости изменяются от 339 до 353 *HV*.

В зонах под вершинами малых деформирующих инденторов МР-ролика $R_{пр1}$, $R_{пр2}$, $R_{пр3}$ (рис. 4.14, точки: D , D_2 , D_3 , сечения №: 2, 4, 6) значения микротвердости варьируются в пределах от 326 до 353 *HV*. В зонах между инденторами, которые в процессе обработки заполняются металлом (рис. 4.14, точки: C_2 , C_3 , C_4 , сечения №: 3, 5, 7) и в которых преобладает высокое гидростатическое давление (до - 1010 МПа), значения микротвёрдости возрастают и варьируются в пределах от 346 до 445*HV*.

Средние значения микротвердости зёрен перлита в интенсивно деформированном слое (до 50 мкм) достигает 365 *HV*, феррита 331*HV*.

В деформированном слое (до 650 мкм) микротвердости зёрен перлита составляет 312 *HV*, феррита 295 *HV*.

В переходном слое глубиной до 3400 мкм значения зёрен перлита варьируются в пределах от 305 *HV* до 313 *HV*, зёрен феррита от 256 *HV* до 283 *HV*.

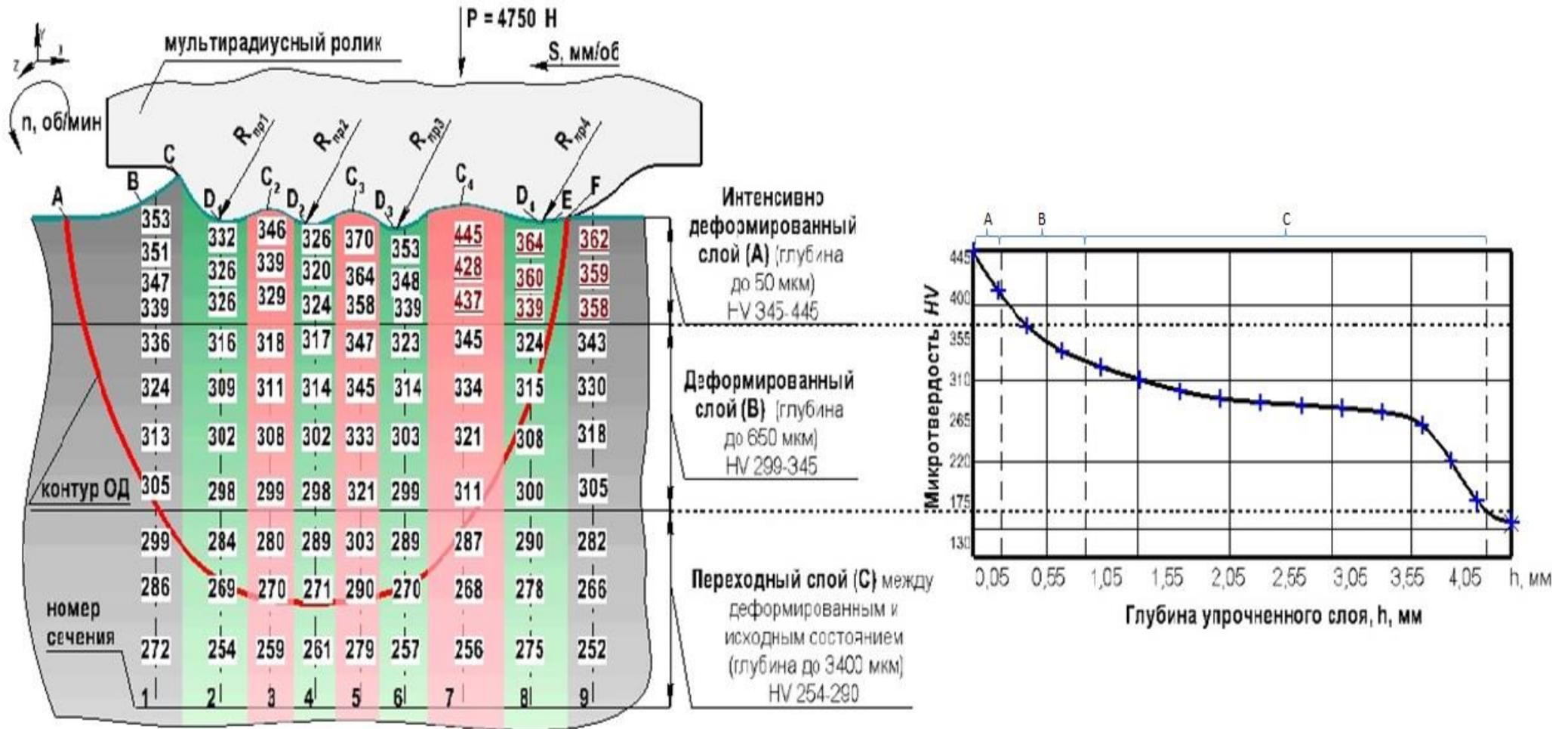


Рисунок 4.14 Экспериментальные значения микротвердости образцов из стали 45 после ППД МР-роликом, при усилии 4750 Н

Анализируя значения микротвердости по глубине упрочненных образцов из стали 45, обработанных с усилиями 2500 и 4750 Н, можно сказать, что, как и для образцов из армко-железа, характерно наличие градиентного упрочнения, с характерными зонами, представленными в таблице 4.3.

Высокие значения микротвердости (360-445 *HV*) в интенсивно деформированном слое для обоих образцов, обусловлены главным образом тонким строением структуры стали 45 после обкатывания МР-роликом. Это подтверждено ОМ и АСМ исследованиями, которые показали, что именно в интенсивно деформированном слое зёрна перлита и феррита тонкие (ширина может варьироваться от 1,2 до 4 мкм) и сильно вытянуты в направлении подачи МР-ролика.

Таблица 4.3 Сравнительная таблица глубины упрочнения и среднее значение микротвердости в зависимости от усилия обработки МР-роликом

Характеристика деформированного слоя	ППД МР-роликом (сталь 45), при $P = 2500$ Н		ППД МР-роликом (сталь 45), при $P = 4750$ Н	
	Глубина деформированного слоя, мм	Средние значения микротвердости, <i>HV</i>	Глубина деформированного слоя, мм	Средние значения микротвердости, <i>HV</i>
Интенсивно деформированный слой, мм	0,63	258-360	0,5	326-445
Деформированный слой, мм	1,71	230-260	0,65	290-343
Переходный слой, мм	0,67	215-220	3,4	254-290
Глубина упрочнения, мм	3,01		4,1	

Важно отметить, что и для образца, обработанного с усилием 2500 Н, и для образца, обработанного с максимальным усилием (4750 Н) наибольшие значения микротвердости (326-426 *HV*) локализованы в интенсивно деформированном слое, в зонах между инденторами (рис. 4.15): $R_{\text{пр1}}$ и $R_{\text{пр2}}$; $R_{\text{пр2}}$ и $R_{\text{пр3}}$; $R_{\text{пр3}}$ и $R_{\text{пр4}}$, что в свою очередь подтверждает ранее выдвинутую гипотезу о том, что в зонах между инденторами МР-ролика локализуется интенсивное напряженно-деформированное состояние с преобладающим высоким гидростатическим давлением.

Значения микротвердости под вершинами первого, второго и третьего малого индентора МР-ролика несколько снижается и варьируется в пределах от 264 до 270 *HV* (при $P = 2500$ Н) и от 326 до 358 *HV* (при $P = 4750$ Н) (рис. 4.15). При этом, стоит отме-

тить важную роль четвертого, наибольшего индентора: в зоне контакта $R_{пр4} = 3$ мм значения микротвердости высокие и изменяются в пределах от 258 до 267 (при $P = 2500$ Н) и от 340 до 353 HV (при $P = 4750$ Н) (рис. 4.15).

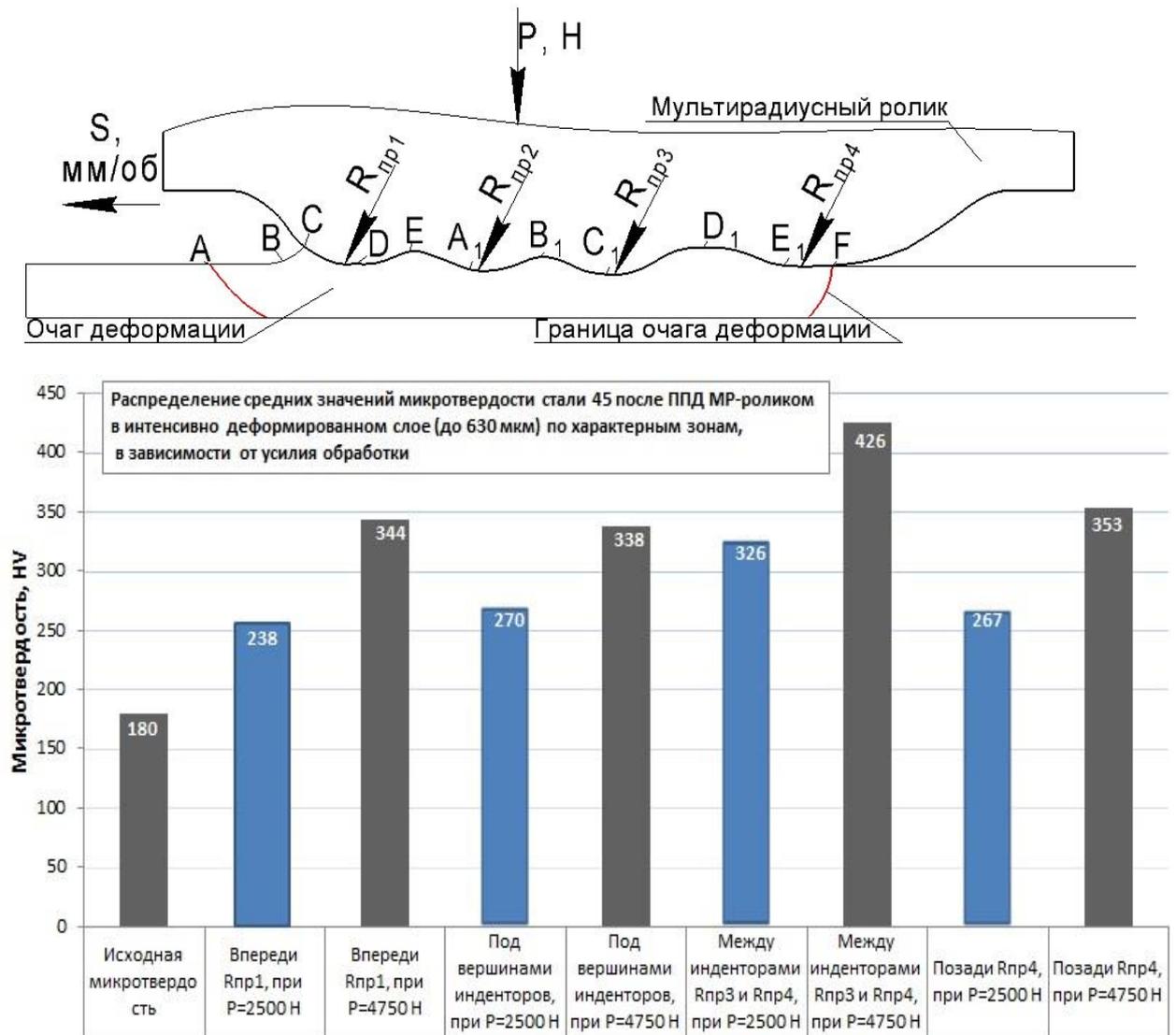


Рисунок 4.15 Гистограмма распределения средних значений микротвердости стали 45 после ППД МР-роликом в интенсивно деформированном слое (до 630 мкм) по характерным зонам в зависимости от усилия обработки

Постепенное снижение микротвердости по глубине упрочненных образцов обусловлено следующим: увеличением межпластинчатого расстояния и снижением уровня деформационного упрочнения металла; изменением строением структуры: с увеличением глубины упрочнения тонкие, вытянутые в направлении подачи зерна меняют свою форму в сторону исходного состояния; снижением действия полей напряжений.

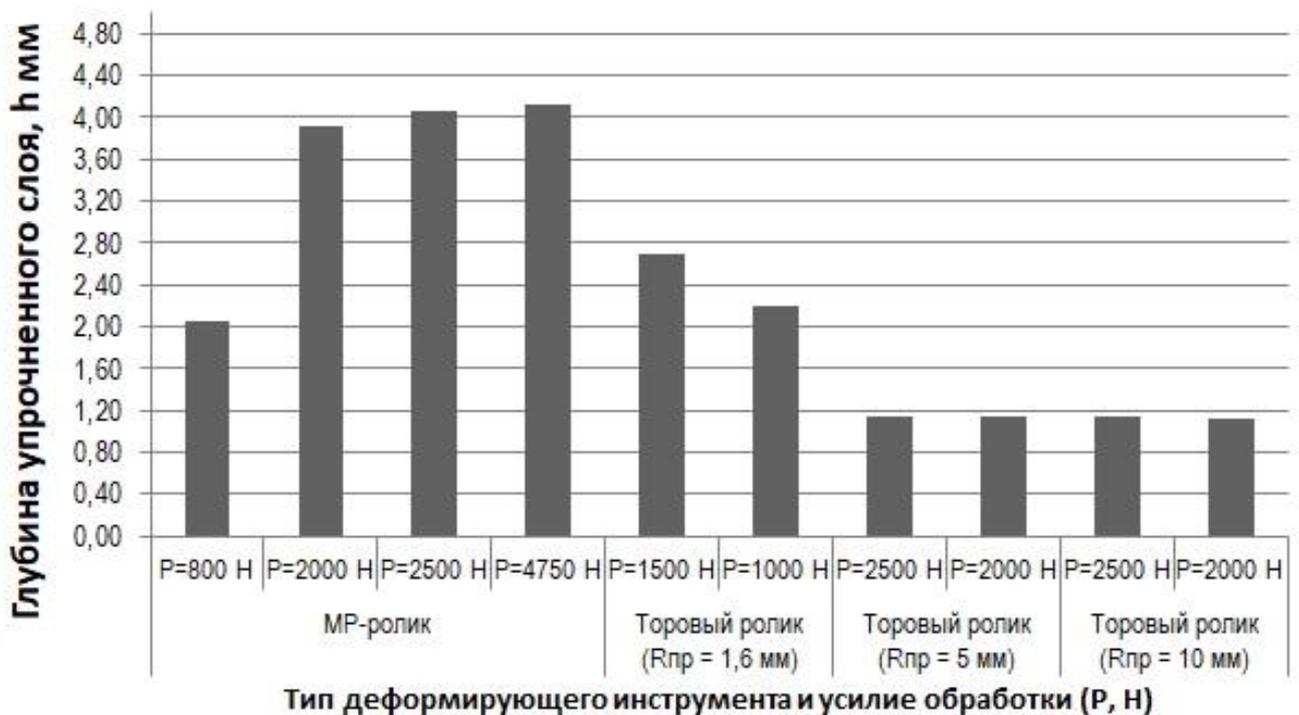
Анализируя полученные данные, можно дать следующие рекомендации по выбору усилия обкатывания МР-роликом:

- обкатывание МР-роликом с усилием $P=2500$ Н следует использовать тогда, когда требуются равномерное распределение упрочнения, высокие значения поверхностной микротвердости (до 360 HV) и глубина упрочнения до 3,01 мм.
- обкатывание МР-роликом с максимальным усилием $P=4750$ Н целесообразно использовать тогда, когда необходим значительно упрочненный поверхностный слой (до 445 HV) и большая глубина упрочнения (до 4,1 мм) при гарантированном отсутствии разрушения поверхностного слоя детали.

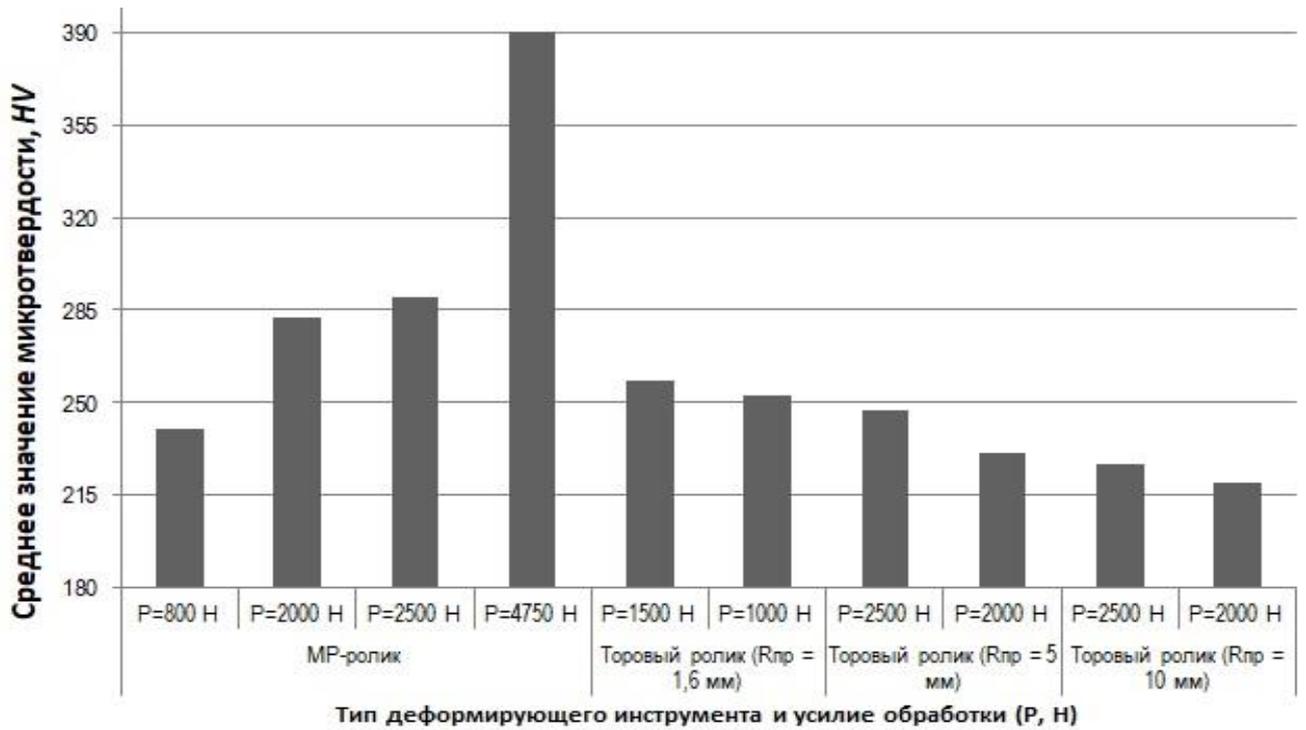
На рисунке 4.16 представлены диаграммы распределения параметров упрочнения в зависимости от типа обрабатывающего инструмента и усилия обработки. Из диаграмм видно, что наибольшие значения глубины упрочнения можно наблюдать при обработке МР-роликом.

При обработке торowymi роликами большее упрочнение наблюдается при использовании роликом $R_{\text{пр}}=1,6$ мм. Наименьшая глубина упрочнения наблюдается при обработке торовым роликом с наибольшим профильным радиусом $R_{\text{пр}} = 10$ мм.

После упрочнения традиционными однороликовыми инструментами ($R_{\text{пр}} = 5$ мм; $R_{\text{пр}} = 10$ мм) наблюдаются незначительное увеличение микротвердости (220-236 HV), однако после упрочнения торовым роликом с профильным радиусом $R_{\text{пр}} = 1,6$ мм, наблюдаются средние значения микротвердости (240-250 HV).



а)



б)

Рисунок 4.16 Диаграммы распределения параметров упрочнения в зависимости от типа обрабатываемого инструмента и усилия обработки: а) глубина упрочнения (h , мм); б) среднее значение микротвердости (HV)

Для всех поверхностей, обработанных торowymi роликами, характерно более плавное распределение микротвердости. На рисунке 4.16, б представлена диаграмма распределения средних значений микротвердости по глубине в зависимости от типа деформирующего инструмента и усилия обкатывания.

Так, обработка торовым роликом ($R_{пр} = 10$ мм) позволяет упрочнить поверхностный слой до 220-225 HV при усилии обкатывания 2500 Н. Значения микротвердости при обкатывании роликом с $R_{пр} = 5$ мм достигают 230-235 HV . Наибольший упрочняющий эффект при обработке однороликовыми инструментами можно наблюдать при обкатывании торовым роликом $R_{пр} = 1,6$ мм (249-253 HV).

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 (4.4-4.6):

$$HV = 161,93 + 0,07 \times P - 3,05 \times 10^{-6} \times P^2 \quad (4.4)$$

$$\delta = 0,004 + 0,002 \times P - 1,81 \times 10^{-8} \times P^2 \quad (4.5)$$

$$h = 0,28 + 0,0022 \times P - 2,91 \times 10^{-7} \times P^2 \quad (4.6)$$

Таким образом, ППД МР-роликом приводит к появлению градиентного упроч-

ненного слоя и увеличению микротвердости поверхностного слоя армко-железа (до 162 HV) и отожженной стали 45 до 350-426 HV . Структурообразование в упрочненном имеет наследственный характер. У поверхности преобладает феррито-перлитная структура с высокой микротвердостью. По мере углубления микротвердость образцов постепенно и равномерно понижается (15-20 мкм от свободного края поверхности).

4.4 Исследование упрочненного поверхностного слоя методами оптической (ОМ), атомно-силовой (АСМ) микроскопии и рентгеноструктурного анализа (РСА)

4.4.1 Исследование упрочненного слоя

Металлографические исследования упрочненного и неупрочненного слоя проводили в соответствии с методикой, изложенной в главе 3. В подразделе представлены результаты оптической, атомно-силовой микроскопии и рентгеноструктурного анализа образцов из армко-железа и стали 45 до и после ППД МР-роликом.

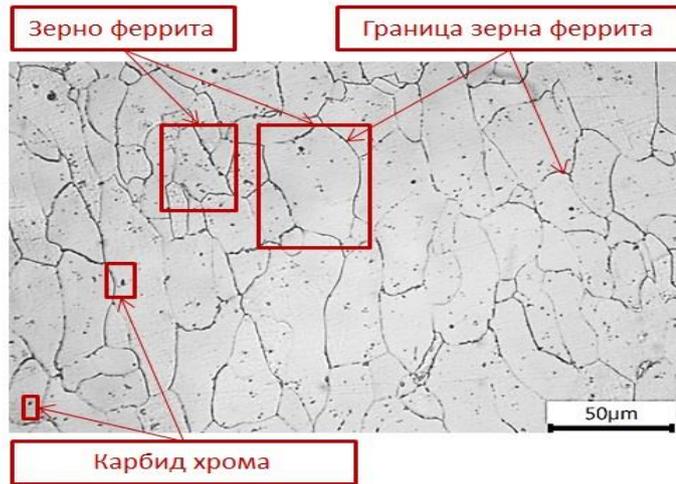
Металлографический анализ структуры армко-железа на оптическом микроскопе показал, что в исходном состоянии образец имеет ферритную структуру, с точечными включениями карбида хрома ($Cr_{0,260\%}$), (рис. 4.17, а).

Средний размер зерна армко-железа в исходном состоянии составил: по горизонтали $\sim 10 \pm 3,2$ мкм, по вертикали $\sim 45 \pm 5,4$ мкм (табл. 4.4). Зёрна представлены преимущественно полиэдрической формы с четко выраженными, прямолинейными границами, однородны и равноосны (рис. 4.17, а).

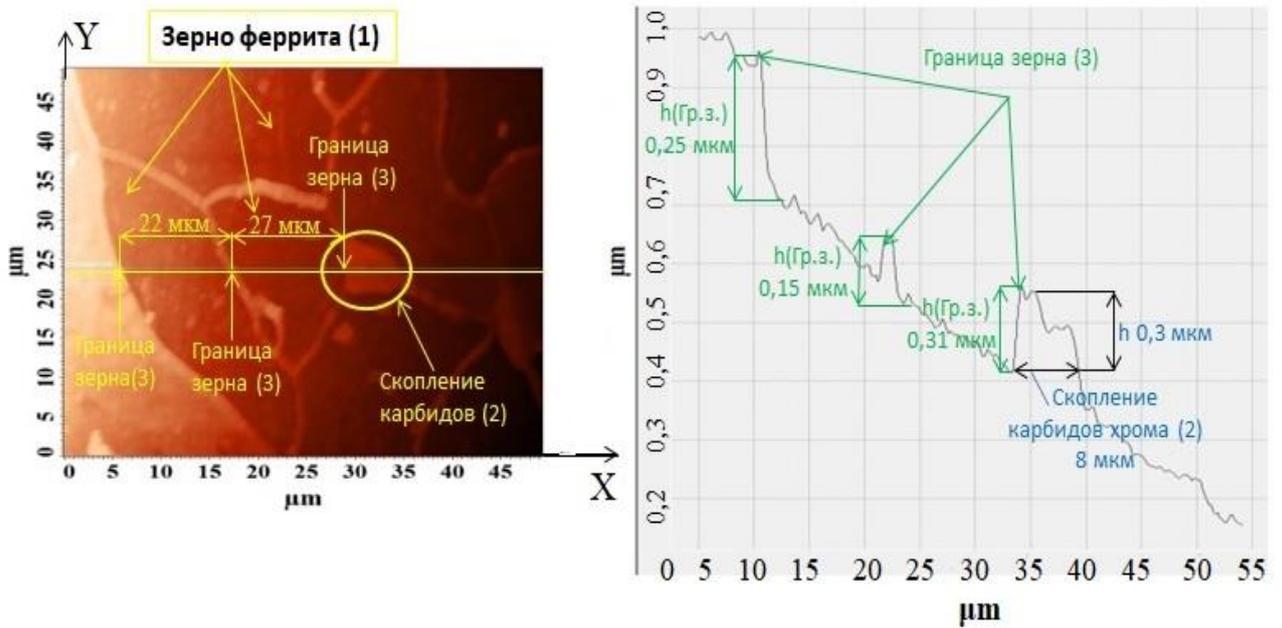
Следует отметить, что методом оптической микроскопии элементы мелкой структуры ограничены размером ~ 1 мкм, в связи с этим, исследования элементов мелкой структуры проводились методами атомно-силовой микроскопии.

Размеры элементов структуры (табл. 4.4) с атомно-силового микроскопа снимали методом профилограммы (рис. 4.17, б), размеры исследуемого участка составили 50×50 микрон. Высота границ зёрен ($h_{гр.з}$) изменяется в пределах от 0,15 мкм до 0,31 мкм, а ширина варьируется в пределах от 3,5 мкм до 10 мкм (рис. 4.17, б).

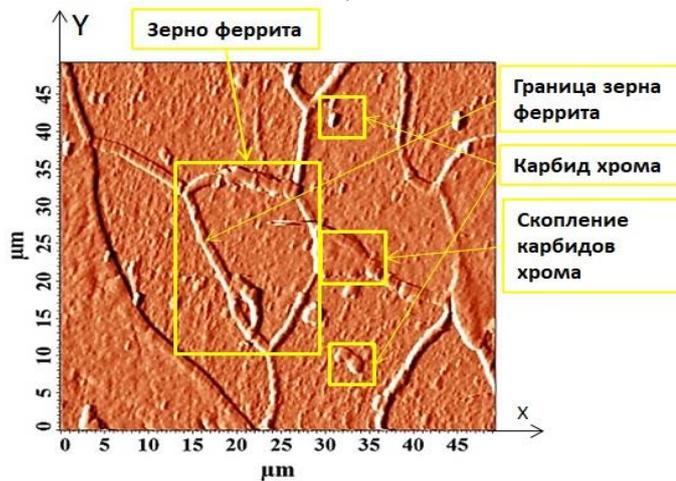
Анализ 2D скан-изображения исходной структуры армко-железа (рис. 4.17, в) показал, что в зернах феррита (\sim ширина 25 мкм, \sim высота 43 мкм), и по его границам, обнаружены включения (карбиды хрома), как отдельно стоящие друг от друга, так и образующих целые скопления (высота 0,3 мкм, ширина 8 мкм) (рис. 4.17, в).



а)



б)



в)

Рисунок 4.17 Структура армко-железа в исходном состоянии: а) ОМ-изображение, увеличение 500 крат; б) 2D Скан-изображение с профилограммой исходной структуры армко-железа, полученное АСМ-методом; в) 2D Скан-изображение поверхности (исходное состояние) армко-железа

Таблица 4.4 Экспериментальные значения параметров структуры армко-железа в исходном состоянии

Глубина, мм	Размер зерна феррита		Высота границ зерен, $h_{гр.з.}$, мкм	Ширина границ зерен, $a_{гр.з.}$, мкм
	ширина, мкм	высота, мкм		
0,01-0,5	10-12	43-50,2	0,3-0,31	3-3,5
0,5-1,5	10-15,2	50-51,4	0,3-0,42	5,4-8,3
1,5-4,5	15-25,5	50-52	0,5-1	8,5-10

Металлографический анализ структуры образцов из стали 45 в исходном состоянии на оптическом микроскопе показал, что образец имеет феррито-перлитную структуру, границы зёрен четко выражены (рис. 4.18, а). Средняя величина зерна стали 45 в исходном состоянии составила: по горизонтали $\sim 15 \pm 1,5$ мкм, по вертикали $\sim 50 \pm 5$ мкм (табл. 4.5).

Таблица 4.5 Экспериментальные значения параметров структуры стали 45 в исходном состоянии

Глубина, мм	Размер зерна феррита		Размер зерна перлита	
	ширина, мкм	высота, мкм	ширина, мкм	высота, мкм
0,01-0,5	5-10,5	11,3-15,8	13-15	50-51,8
0,5-1,5	6-9,9	12-16	13,4-16,2	50,5-52,4
1,5-4,5	6,3-12,5	13,2-16,9	15-20	50-55,4

Размеры элементов структуры с атомно-силового микроскопа снимали методом профилограммы (рис. 4.18, б), размеры исследуемого участка составили 50×50 микрон. Высота границ зёрен ($h_{гр.з.}$) изменяется в пределах от 0,10 мкм до 0,28 мкм, а ширина границ зёрен варьируется в пределах от 1 мкм до 2 мкм (рис. 4.18, б). Анализ скан-изображений, полученных методами АСМ показал, что структура стали 45 в исходном состоянии представлена равноосными, крупными (рис. 4.18 а, б, в) зёрнами феррита и перлита, при этом перлит имеет характерную полосчатость (рис. 4.18, в), чего не видно на оптическом микроскопе. Высота границ пластинок перлита в исходном состоянии изменяется в пределах от 170 нм до 190 нм, а ширина варьируется в пределах от 0,7 мкм до 1 мкм. Стоит отметить, что на некоторых участках рельефа неупрочненной поверхности стали 45 видно, что цементит в перлите имеет вид тонких параллельно расположенных пластинок внедренных в матрицу ферритного зерна (рис. 4.18, в). При этом, пластины цементита имеют прерывистый вид (рис. 4.18, в). Данное обстоятельство объясняется тем, что если группа из прерывистых пластин пересекаются с плоскостью шлифа, то цементитные пластины кажутся короткими, которые на АСМ скан-изображении по-

казаны в области пластинчатого перлита (рис. 4.18, в). Размеры пластинок цементита внедренных в матрицу ферритного зерна снимали методом профилограмм, размеры исследуемого участка составили 10×10 микрон (рис. 4.18, в). Высота цементитных пластинок (h гр.ц) изменяется в пределах от 18 нм до 50 нм. Ширина пластинок цементита варьируется в пределах от 0,2 мкм до 0,65 мкм. Межпластинчатое расстояние изменяется в пределах от 1 до 2 мкм.

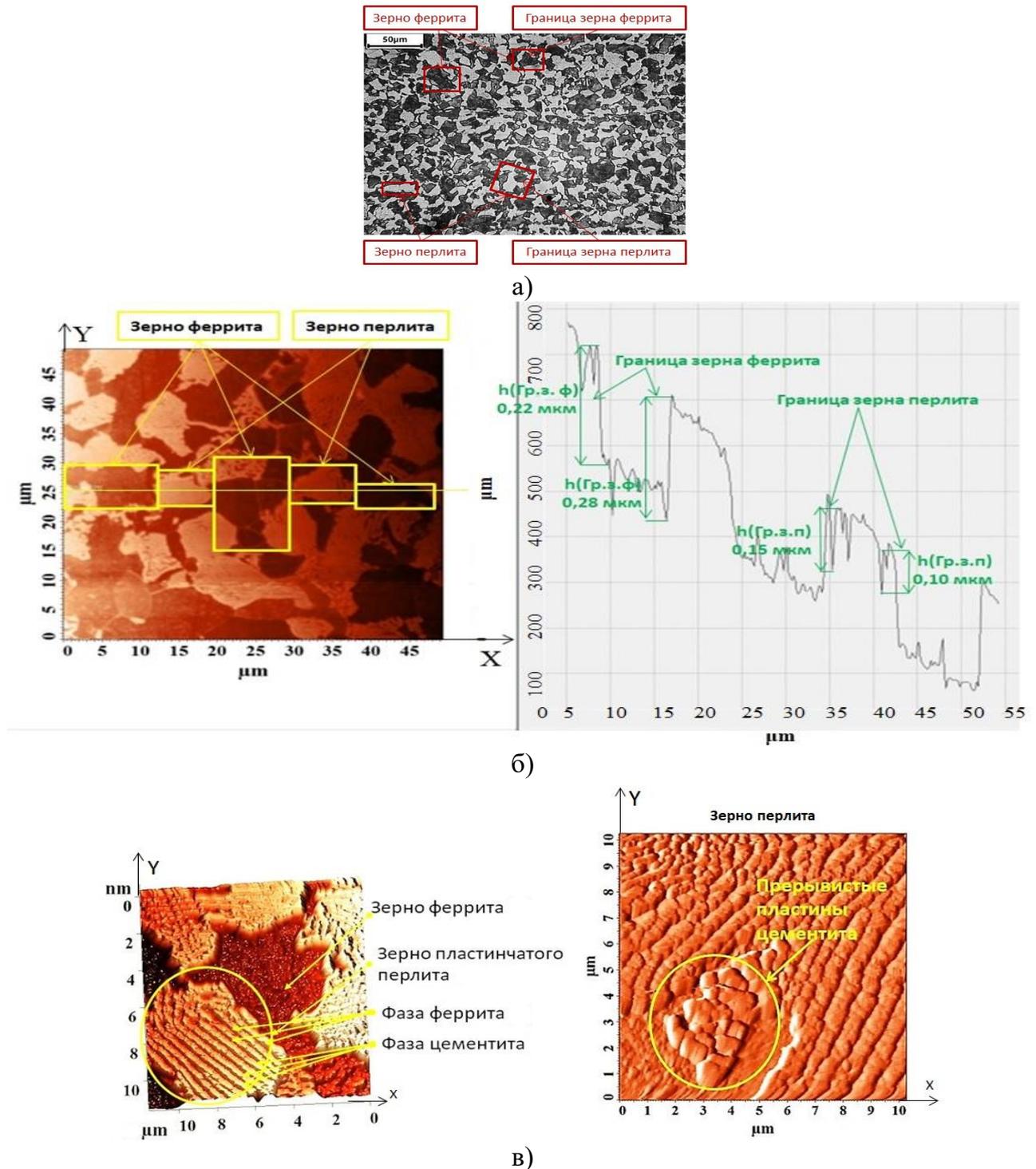


Рисунок 4.18 Структура стали 45 в исходном состоянии: а) ОМ-изображение, увеличение 500 крат; б) 2D Скан-изображение с профилограммой исходной структуры стали 45,

полученное АСМ-методом; в) 3DСкан-изображение рельефа поверхности стали 45 (исходное состояние), полученное АСМ-методом

После ППД МР-роликом армко-железа с усилием 800 Н средний размер ферритного зерна вблизи свободного края поверхности (0,01-0,02 мм) составляет 30-40 мкм. Металлографический анализ образца из армко-железа, обработанный МР-роликом с усилием 800 Н, не выявил каких-либо изменений (рис. 4.19, а, б). Однако, выше приведённые результаты измерения микротвердости говорят об упрочнении ПС образца на глубину до 2,75 мм (табл. 4.6).

Таблица 4.6 Сравнительная таблица деформированного слоя и средние значение элементов структуры армко-железа, при обработки

МР-роликом с усилием 800 Н

Глубина упрочнённого слоя, мм и (HV)	Размер зерна феррита		Высота границ зерен, $h_{гр.з.}$, мкм	Ширина границ зерен, $a_{гр.з.}$, мкм
	ширина, мкм	высота, мкм		
0,90 (146 HV)	10-12	40-42	0,02-0,215	0,025-2
1,50(144 HV)	10-15	43-45	0,065-1,12	0,4-2
2,75(140 HV)	10-15	43-45	1-1,2	0,5-3

Металлографический анализ образца из армко-железа, обработанный МР-роликом с усилием 2700 Н показал, что от края свободной поверхности (0,01-0,02), обнаружен интенсивно деформированный слой глубиной 150 мкм (рис. 4.19, в, г), средний размер зерна в данной области составил: по горизонтали $2 \pm 1,5$ мкм, по вертикали $\sim 20 \pm 5$ мкм (табл. 4.7). Из рисунков (4.19, в, г) видно, что зерна тонкие, но сильно вытянуты вдоль направления течения металла, имеют одну ориентацию (30 град.) местами повторяют волнообразный контур рабочей части МР-ролика.

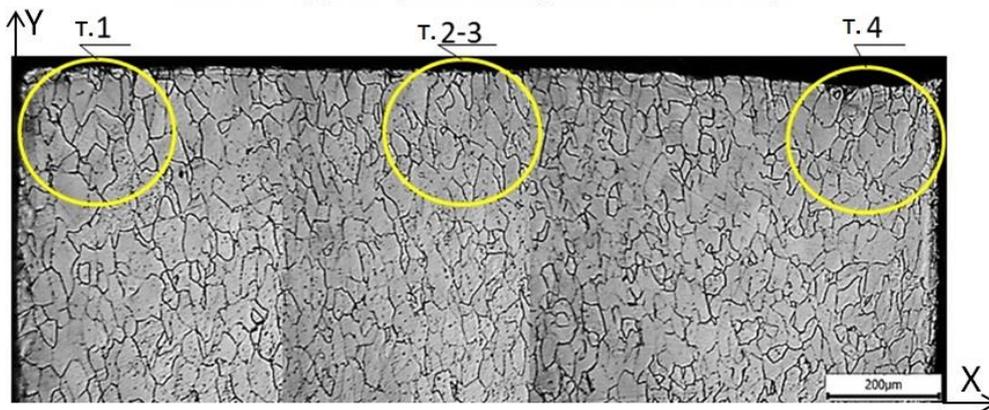
На глубине 150 мкм, от свободного края поверхности, можно наблюдать деформированный слой (глубиной 50 мкм), в котором зёрна чуть менее вытянуты в направлении течения металла и несколько увеличены. При этом, средний размер зерна составил: по горизонтали $4 \pm 1,1$ мкм, по вертикали $\sim 23 \pm 1,8$ мкм. На глубине 200 мкм от свободного края поверхности, обнаружен переходный слой между деформированным и исходным состоянием (глубина 250 мкм), в котором можно наблюдать, что деформированное ферритное зерно увеличивается в размерах (рис. 4.19,в). Средний размер зерна на данном участке составил: по горизонтали $5 \pm 2,3$ мкм, по вертикали $\sim 25 \pm 3$ мкм (табл. 4.7). Размеры элементов структуры с атомно-силового микроскопа снимали методом

профилограммы (рис. 4.19, г), размер исследуемого участка составил 25×25 микрон, результаты измерений приведены в таблице 4.7.

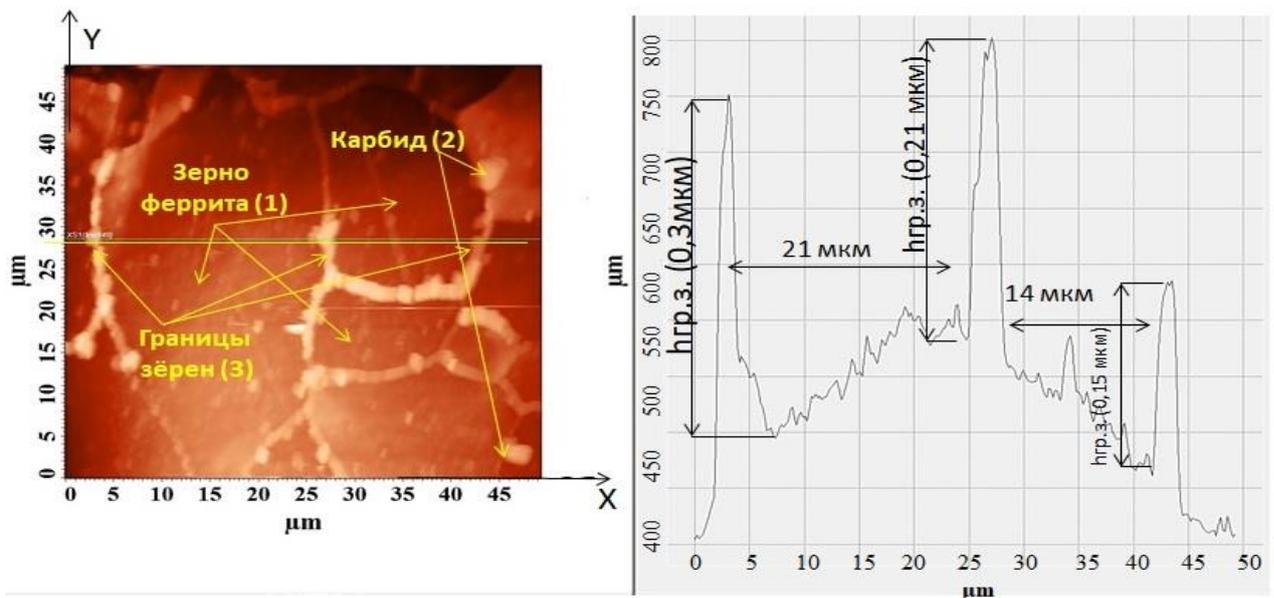
Таблица 4.7 Сравнительная таблица деформированного слоя и средние значение элементов структуры армко-железа, при обработки МР-роликом с усилием 2700 Н

Характеристика деформированного слоя	Глубина деформированного слоя, мкм	Размер зерна феррита		Высота границ зерен, $h_{гр.з.}$, мкм	Ширина границ зерен, $a_{гр.з.}$, мкм
		ширина, мкм	высота, мкм		
Интенсивно деформированный слой	150	2-2,5	20-22	0,01-0,015	0,50-0,60
Деформированный слой	50	4-5,1	23-24	0,01-0,08	0,5-1
Переходный слой	250	5-7,23	25-28	0,012-0,08	0,5-1

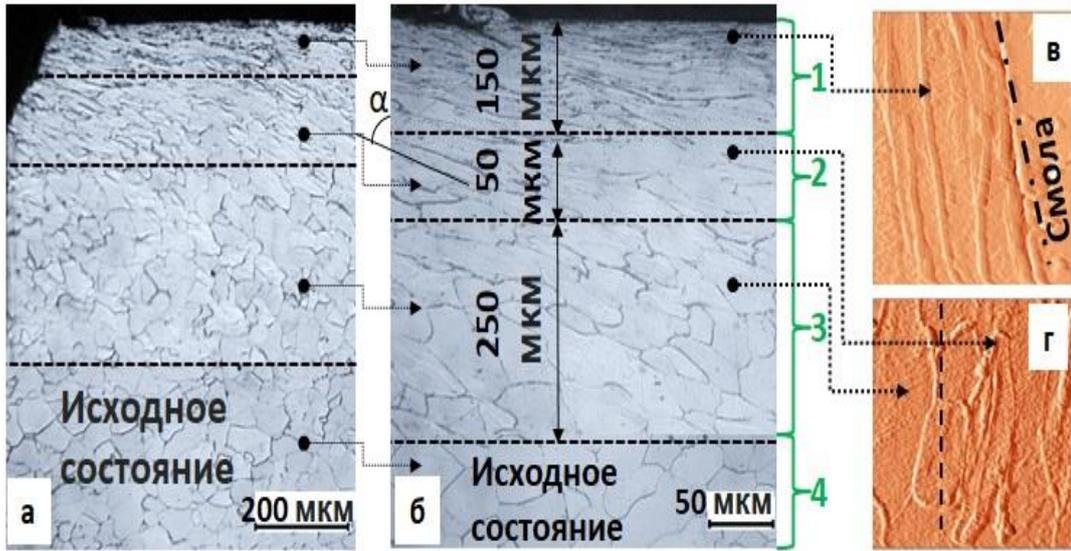
Области ОМ исследований образца из армко-железа после ППД МР-роликом, (усилие, $P=800$ Н)



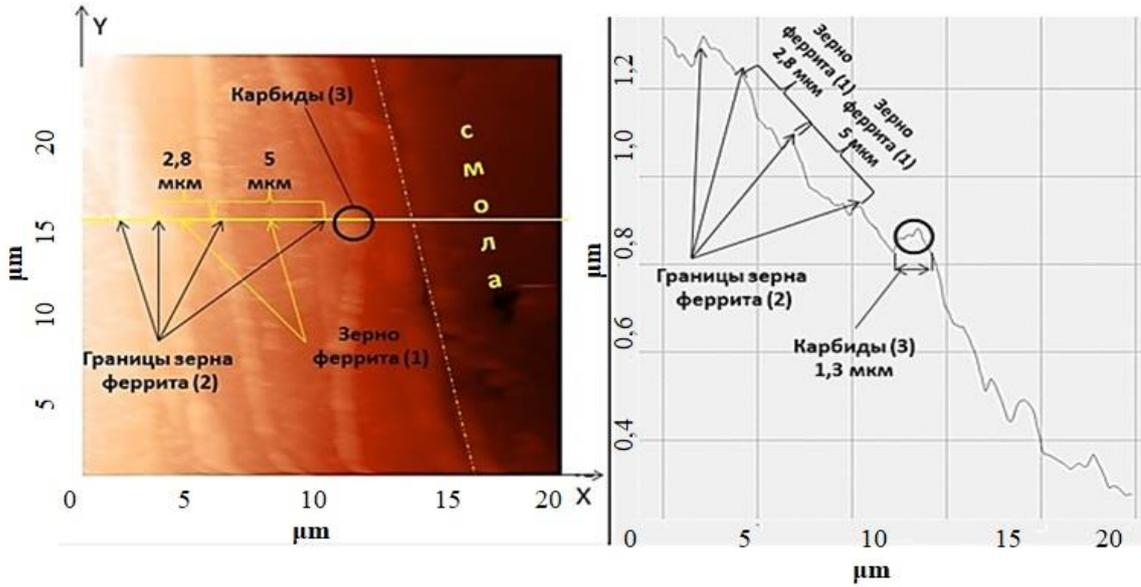
а)



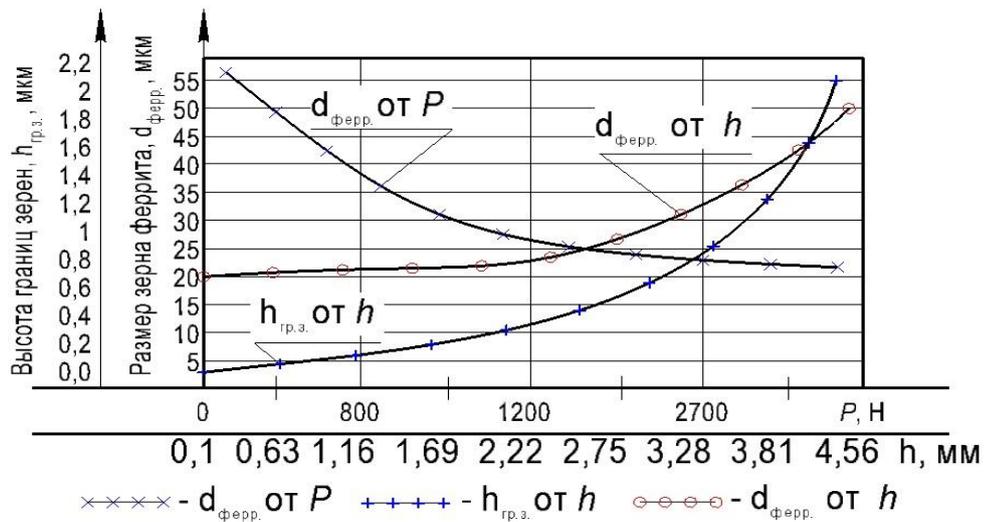
б)



в)



г)



д)

Рисунок 4.19 Структура армко-железа после ППД МР-роликом: а) При усилии 800 Н, ОМ-изображение (увеличение 200 крат); б) При усилии 800 Н, 2Dскан-изображение с

профилограммой структуры; в) При усилии 2700, схематическое изображение деформированной структуры; г) При усилии 2700 Н, 2Dскан-изображение с профилограммой структуры; д) Экспериментальные значения параметров структуры армко-железа после ППД МР-роликом

Таким образом, обработка ППД МР-роликом образцов из армко-железа с усилием 2700 Н по сравнению с обработкой с меньшим усилием 800 Н приводит к появлению значительного деформированного слоя (глубиной до 450 мкм) и измельчению зерен феррита в 2 раза, без разрушения поверхностного слоя (рис. 4.19).

Отличительными особенностями зёрен в упрочненной области являются их «вытянутая» форма в направлении движения подачи МР-ролика и искривленные границы зерен. Несмотря на то, что при обработке образца с усилием (800 Н), методами ОМ и АСМ-микроскопии явных изменений в структуре не было обнаружено, микротвердость образца увеличивается и варьируется в пределах от 140 до 146HV, размер зерна при этом практически остается неизменным.

В результате рентгеноструктурного анализа (РСА) образцов из армко-железа установлено, что ППД МР-роликом образца, обработанного с усилием 2700 Н, приводит к уменьшению параметра кристаллической решетки $\alpha\text{-Fe}$ в тонком поверхностном слое (до 50 мкм) середине шлифа упрочненного слоя (точка исследования № 2) $a=0,28664$ нм (рис. 4.20, табл. 4.8).

Рентгеновские дифракционные линии от матричной α -фазы существенно размываются (рис.4.20), а уширение формы профилей дифракционных линий вероятно связано с уменьшением областей когерентного рассеяния (ОКР) в результате измельчения структуры (таблица 4). Размер ОКР уменьшился в 1,4 раза по сравнению с областью центра шлифа (неупрочненный слой).

Расчет параметра решетки для образца осуществлялся по 3 пикам (110), (200) и (211), а микродисторсия определялась по пику (211) (рис.4.20). На рис. 4.20 приведены фрагменты рентгеновских дифрактограмм ПС образца из армко-железа обработанного с усилием 800 Н.

Значение параметра ОЦК кристаллической решетки $\alpha\text{-Fe}$ вне упрочненной части образца составляет $a=0,28661$ нм. Дифракционные линии матричной фазы $\alpha\text{-Fe}$ узкие, как и в случае образца обработанного с усилием 2700 Н. Выявлено, что ППД МР-

роликом образца обработанного с усилием 800 Н приводит к увеличению параметра кристаллической решетки $\alpha - Fe$ в упрочненном слое $a=0,28675$ нм (табл.4.8).

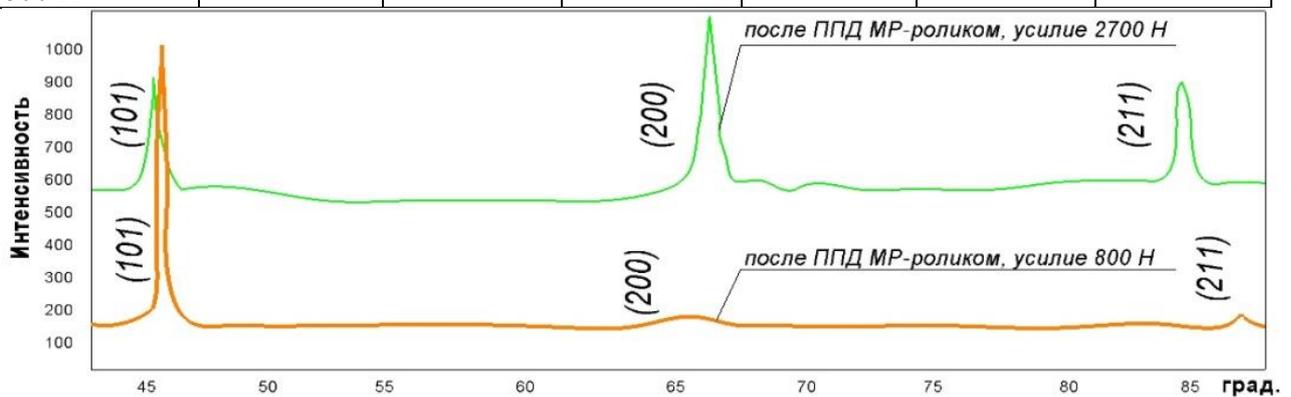
Рентгеновские дифракционные линии от матричной α -фазы существенно размываются (рис.4.20), отчетливо выделяется пик (110) и отмечается уменьшение областей когерентного рассеяния в 1,2 раза по сравнению в область центра шлифа (табл. 4.8).

Установлено, что с увеличением усилия обкатывания при ППД МР-роликом средний размер кристаллитов уменьшается до 40 нм, что коррелирует с результатами, полученными методом атомно-силовой микроскопии (АСМ).

На рисунке 4.21 представлена линейная зависимость уровня микроискажений кристаллической решетки ($\langle \varepsilon^2 \rangle^{1/2}$) от среднего размера кристаллитов (D). Видно, что обработка образца с наибольшим усилием (2700 Н), приводит к значительному микроискажению решетки (при исходном значении $0,9 \cdot 10^{-3}$). Наличие микроискажений обусловлено в основном наличием линейных и точечных дефектов кристаллической решетки.

Таблица 4.8 Результаты РСА образцов из армко-железа, после ППД МР-роликом

Материал образца, усилие обработки, Н	Изменение межплоскостного расстояния, 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 ППД МР-роликом	исходное состояние	после ППД МР-роликом	исходное состояние	после ППД МР-роликом
Армко-железо, 2700 Н	2,867	2,866	56	41	0,9	2,0
Армко-железо, 800 Н	2,661	2,867	60	51	0,9	1,3



а)

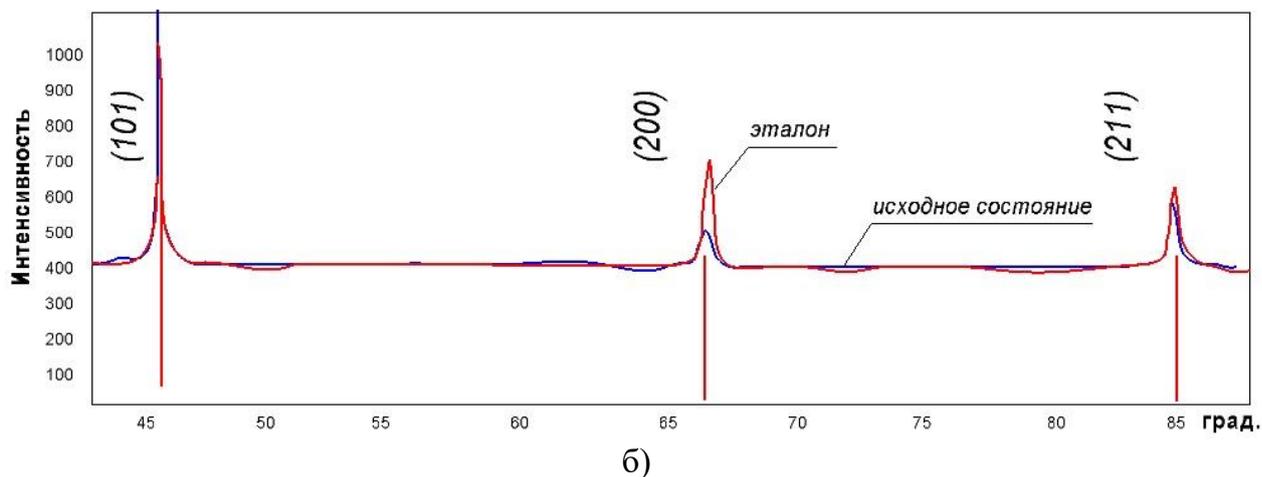


Рисунок 4.20 Фрагменты рентгеновских дифрактограмм ($CuK\alpha$) образцов из армко-железа: а) после ППД МР-роликом с усилием 2700 Н и 800 Н; б) неупрочненный слой

Кроме того, известно, что в материалах с наноразмерной структурой ввиду наличия развитой сети межкристаллитных границ, увеличение микродисторсии может быть связано с наличием дефектной структуры границ зерен. В свою очередь, полученные результаты согласуются с данными атомно-силовой микроскопии (АСМ), которые показывают, что обработка МР-роликом с наибольшим усилием, приводит к интенсивной деформации ПС. Такая картина сопровождается «вытягиванием» зерен в направлении главной деформации (направлении подачи МР-ролика) и искривлением границ зерен.

Результаты измерения остаточных напряжений II рода по линиям плоскостей α -железа [110] и [211] приведены в таблице 4.9.

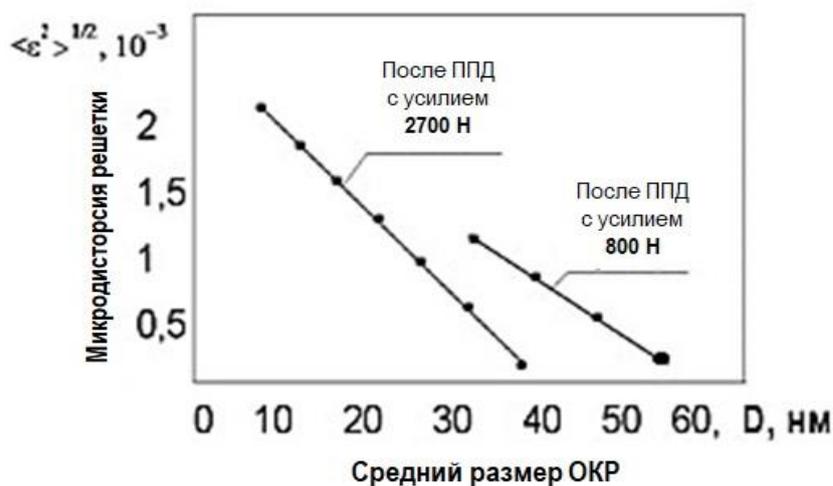


Рисунок 4.21 Зависимость микродисторсии решетки ($\langle \epsilon^2 \rangle^{1/2}, 10^{-3}$) от среднего размера ОКР (D, нм)

Полученные данные соответствуют результатам работ [82, 276-277], согласно которым для получения больших значений сжимающих напряжений, необходимо стремиться обрабатывать детали с большим усилием. При этом, численное значение напря-

жений II рода после ППД МР-роликом значительно увеличивается в результате неоднородной деформации, накопления дефектов и измельчения структуры в упрочненном поверхностном слое.

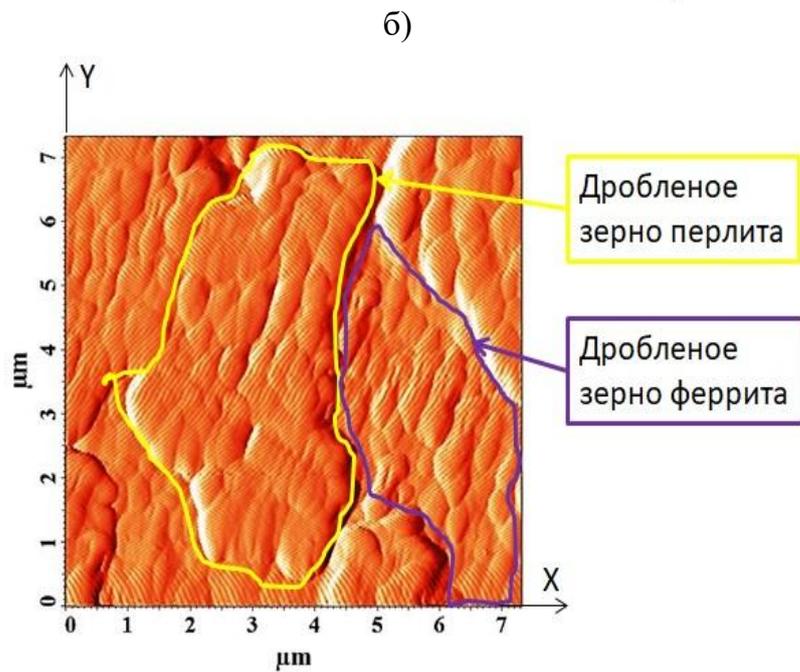
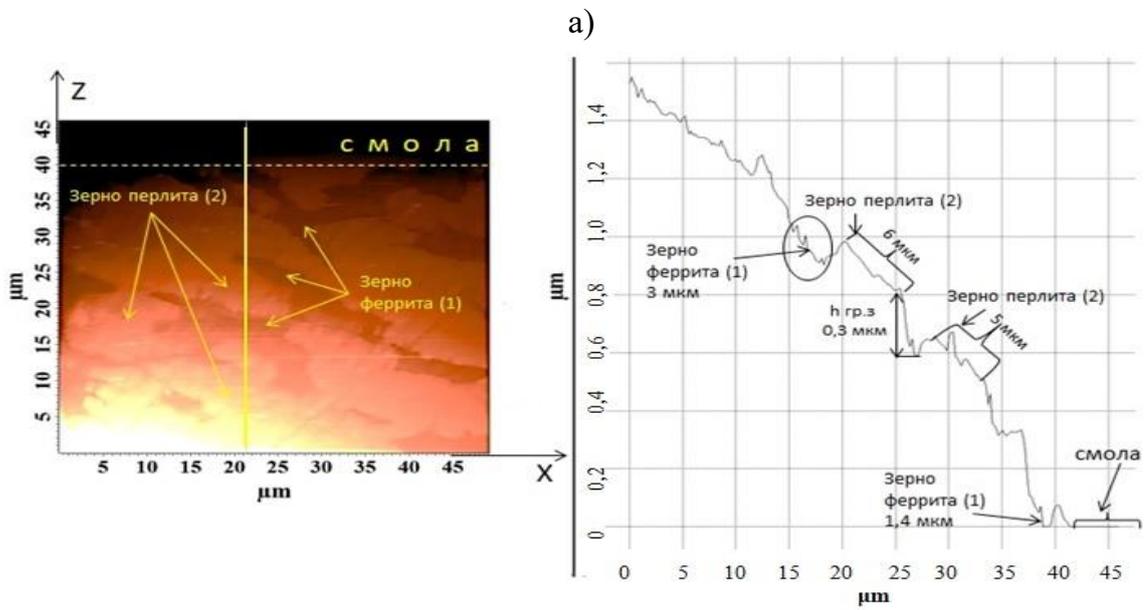
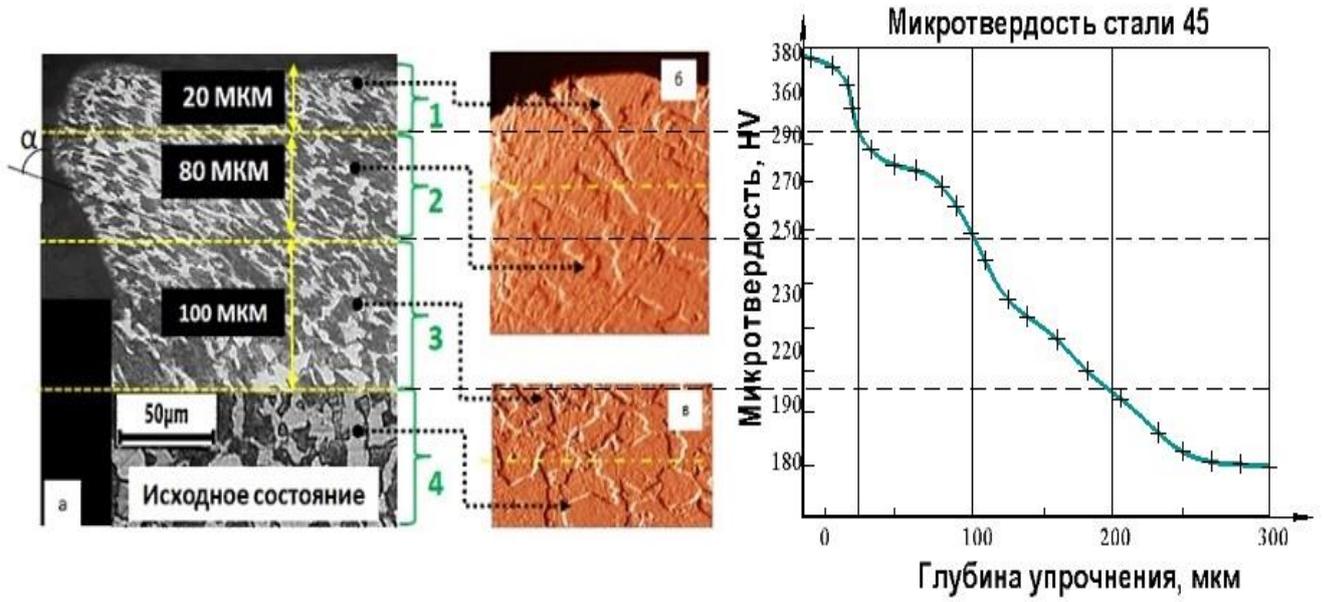
Таблица 4.9 Уровень остаточных напряжений II рода в исследуемых образцах

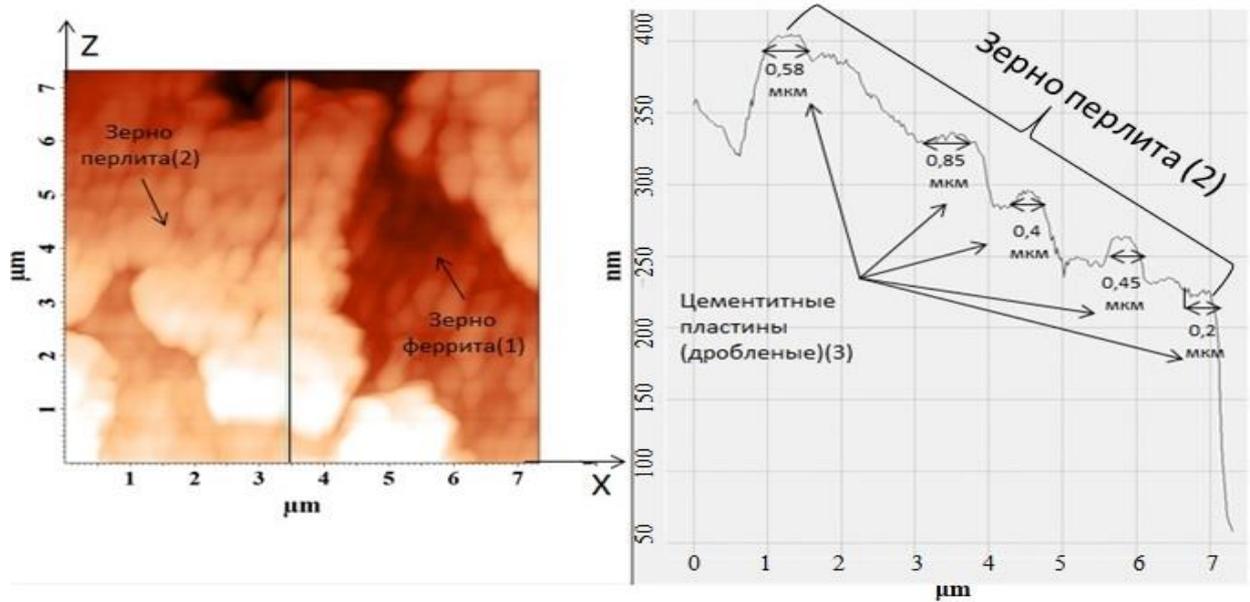
Материал образца, усилие обработки, Н	Остаточные напряжения второго рода, σ_{II} , МПа	
	исходное состояние	после ППД МР-роликом
Армко-железо, 2700 Н	189	-375,578
Армко-железо, 800 Н		-310,163

Металлографический анализ образца из стали 45 после ППД МР-роликом стали 45 с усилием 3000 Н показал, что от края свободной поверхности образца (0,01-0,02 мм) обнаружен деформированный слой глубиной до 200 мкм, который в свою очередь характеризуется наличием 3 зон:

- интенсивно деформированный слой глубиной до 20 мкм (рис. 4.22, а). Средний размер зерна в данной области составил: по горизонтали $2,2 \pm 2$ мкм, по вертикали $\sim 10 \pm 4,5$ мкм (табл. 4.10). Из (рис. 4.22, а) видно, что зерна вытянуты в направлении подачи МР-ролика. Размеры элементов структуры с атомно-силового микроскопа снимали методом профилограммы, размер исследуемых участков составил: 50×50 микрон (рис. 4.22., б, табл. 4.10).
- деформированный слой, глубиной до 80 мкм (рис. 4.22, а), в котором зёрна также имеют вытянутую форму, но имеют несколько большие размеры. Средний размер зерна в данной области составил: по горизонтали 4 ± 1 мкм, по вертикали $\sim 15 \pm 2,5$ мкм (табл. 4.10).
- переходный слой, между деформированным и исходным состоянием, глубиной до 100 мкм, в котором также можно наблюдать увеличение размеров зерен (рис. 4.22, а). Средний размер зерна на данном участке составил: по горизонтали $4 \pm 1,5$ мкм, по вертикали $\sim 18 \pm 2,5$ мкм (табл. 4.10).

Важно отметить, что при обработке МР-роликом, на глубине до 200 мкм, происходит сильная фрагментация структуры, сопровождающаяся дроблением зерен феррита и перлита, а также расслоением в перлитных зернах на чередующиеся участки феррита и цементита (рис. 4.22, в). Отдельные зерна в деформированном слое (глубиной до 200 мкм) имеют одну ориентацию ($\alpha = -30^\circ$). Средний размер фрагментов дробленных цементитных пластин составил: по горизонтали $0,2 \pm 0,6$ мкм, по вертикали $\sim 0,03 \pm 0,015$ мкм (рис. 4. 22, в).





в)

Рисунок 4.22 Структура стали 45 после ППД МР-роликом: а) При усилии 3000 Н, с участками: 1 – интенсивно деформированный слой (20 мкм); 2 – деформированный слой (80 мкм); 3 – переходный слой между деформированным и исходным состоянием (100 мкм); 4 – недеформированный слой (исходное состояние сталь 45); б) 2D Скан-изображение с профилограммой структуры стали 45, после ППД МР-роликом с усилием 3000 Н (интенсивно деформированный слой, глубиной до 20 мкм); в) 3D и 2D скан-изображения с профилограммой зерна перлита (интенсивно деформированный слой, глубиной до 20 мкм)

Таблица 4.10 Сравнительная таблица деформированного слоя и средние значение элементов структуры армко-железа, при обработки МР-роликом с усилием 3000 Н

Характеристика деформированного слоя	Глубина деформированного слоя, мкм	Размер зерна феррита		Размер зерна перлита	
		ширина, мкм	высота, мкм	ширина, мкм	высота, мкм
Интенсивно деформированный слой	20	2-2,2	10-14,5	5-15	10-18
Деформированный слой	80	4-4,1	15-16,5	8-17,5	15-20
Переходный слой	100	4-4,5	18-19,5	10-20	16-21,5

Зависимости параметров микроструктуры стали 45 – размеры зерен феррита (Φ) и перлита (Π) от усилия обкатывания выражаются следующими формулами (4.7-4.8):

$$\Phi = 45,40 - 0,0137 \times P + 1,34 \times 10^{-6} \times P^2 \quad (4.4)$$

$$\Pi = 56,17 - 0,0133 \times P + 8,10 \times 10^{-7} \times P^2 \quad (4.5)$$

Полученные данные коррелируют с результатами ряда исследований [59-60], согласно которым пластическая деформация кристаллических твердых тел протекает фрагментировано, что проявляется в том числе в дроблении зерен. В свою очередь, фрагментация, влияет на дефектную структуру стали 45, а дробление зерен изменяет предел ее текучести, что в совокупности приводит к развороту кристаллической решетки зерен. На рисунке 4.23 приведены фрагменты рентгеновских дифрактограмм поверхностного слоя образца обработанного с усилием 3000 Н в середине упрочненного слоя (глубиной до 50 мкм). Определенное на образце значение параметра ОЦК кристаллической решетки α -Fe в неупрочненной части образца составляет $a = 0,28633$ нм (рис. 4.23,б). Дифракционные линии матричной фазы α -Fe узкие, что свидетельствует о низкой концентрации в ней дефектов кристаллической решетки (рис. 4.23).

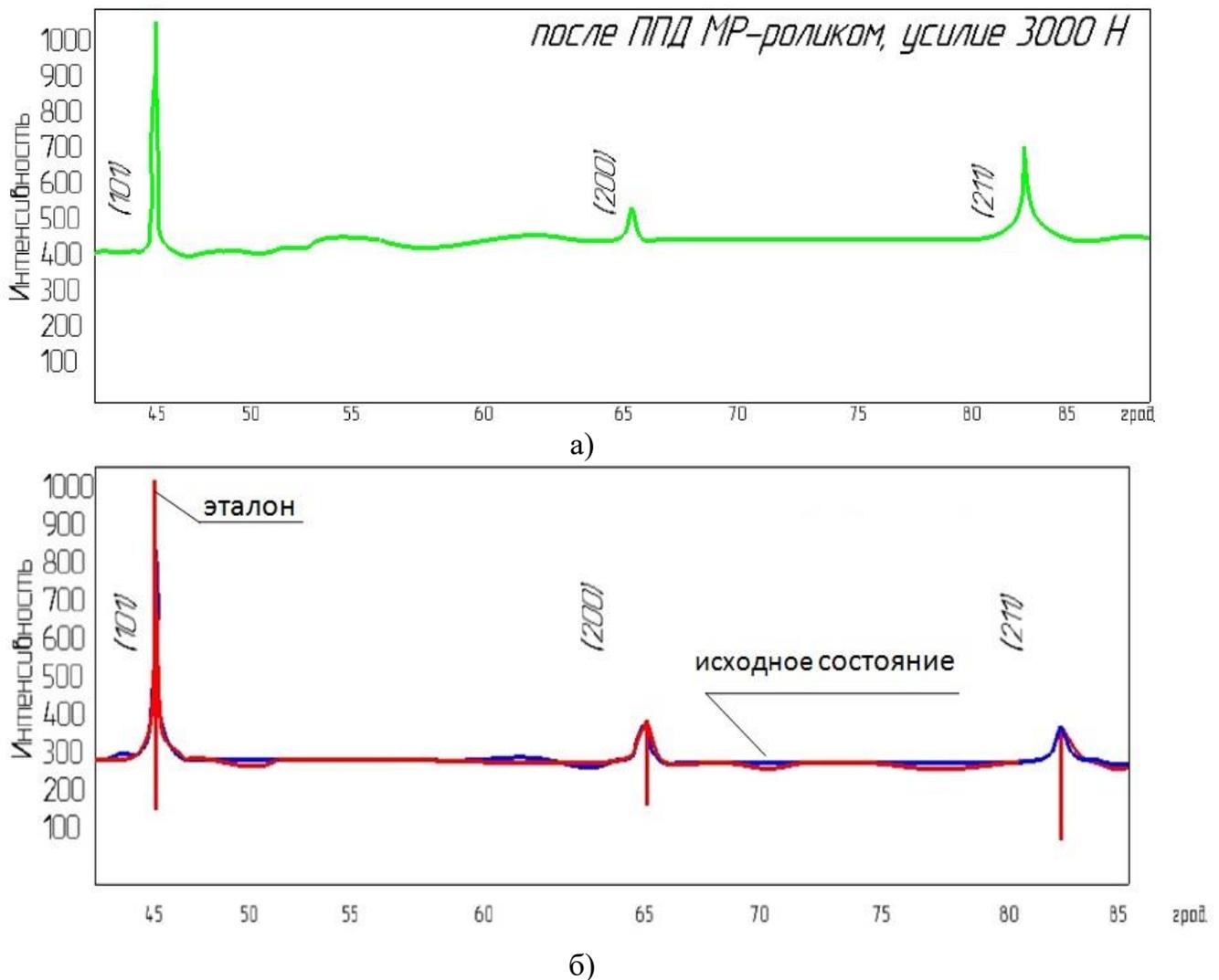


Рисунок 4.23 Фрагменты рентгеновских дифрактограмм ($\text{CuK}\alpha$) поверхностного слоя стали 45 после ППД МР-роликом с усилием 3000 Н: а) упрочненный слой; б) исходное состояние

Выявлено, что ППД МР-роликом приводит к увеличению параметра кристаллической решетки α -Fe в упрочненном слое (рис. 4.23,а), $a = 0,28654$ нм (табл.4.11).

Таблица 4.11 Параметры кристаллической решетки, областей когерентного рассеивания и микродисторсии решетки

Изменение межплоскостного расстояния, а, Å		Размеры области когерентного рассеивания (средний размер кристаллитов,) D, нм		Микродисторсия (микроискажения) кристаллической решетки, $\langle \epsilon^2 \rangle^{1/2}$, 10^{-3}	
исходное состояние	после ППД МР-роликом	исходное состояние	после ППД МР-роликом	исходное состояние	после ППД МР-роликом
2,863	2,865	61	42	0,9	1,4

Рентгеновские дифракционные линии от матричной α -фазы существенно размываются (рис. 4.23,а), а уширение формы профилей дифракционных линий вероятно связано с уменьшением областей когерентного рассеяния (ОКР) в результате измельчения структуры в процессе ППД (табл.4.11). Размер ОКР уменьшился в 1,5 раза по сравнению с областью центра шлифа неупрочненного слоя. Кроме этого регистрируется сильное размытие и уменьшение интенсивности дифракционных линий от частиц Fe_3C (рис. 4.23,а).

Значительное возрастание параметра кристаллической решетки α -Fe может быть вызвано дроблением цементитных пластин Fe_3C в процессе интенсивного пластического деформирования стали при обкатке МР-роликом, что подтверждается методом атомно-силовой микроскопии.

Образующийся при этом твердый раствор углерода в α -Fe характеризуется повышенными значениями параметра кристаллической решетки и твердости. Результаты измерения остаточных напряжений II рода по линиям плоскостей стали 45 [110] и [211] приведены в таблице 4.12.

Таблица 4.12 Уровень остаточных напряжений II рода в образце

Материал образца, усилие обработки, Н	Остаточные напряжения второго рода, σ_{II} , МПа	
	исходное состояние	после ППД МР-роликом
Сталь 45, 3000 Н	199	-430,258

Установлено, что после ППД МР-роликом стали 45с усилием 4750 Н упрочненный слой материала вблизи свободного края поверхности ($\pm 0,01$ - $0,02$ мм) и на глубине

более 400 мкм характеризуется значительной деформацией, которая обнаруживается по вытянутым зернам феррита и перлита (рис. 4.24, а).

Полученный градиентный деформированный слой (глубиной до 700 мкм) можно описать следующими зонами с характерными структурными особенностями:

- А – полоса локализованной деформации сдвига шириной от 5 до 10 мкм, не идентифицируемая на оптическом микроскопе, обнаруженная на атомно-силовом микроскопе, характеризуемая высокими значениями микротвердости (до 460 *HV*) (рис. 4.24, б).

Согласно ряду исследований [278-280] микроструктура полос локализованной деформации (полос белого травления), как правило, очень тонкая и равноосная, размер зерен или ячеек составляет от одной до нескольких десятых микрометра, а разориентировка между ними либо не отмечается, либо колеблется от 2 до 15 градусов.

Формируется полоса деформации в результате воздействия МР-ролика и, как следствие формирования в ПС неоднородной, высокоскоростной деформации и высокого гидростатического давления. Существует большая вероятность того, что сильно повышенная микротвердость преобразованной полосы вызвана в первую очередь тонкостью зернистой структуры;

- В – интенсивно деформированный слой (глубина от 25 до 150 мкм), идентифицирующийся на ОМ-изображениях (рис. 4.24, а).

В данной области преобладает смешанная, дисперсная структура, характеризующаяся сложным и неоднородным строением, границы зёрен в данной зоне размыты и плохо читаемы, методом ОМ детально изучить не удастся (рис. 4.24, а, б).

При исследовании данного методом АСМ выявлено наличие сильно вытянутых в направлении подачи зерен феррита и перлита, при этом для пластинок цементита в перлите характерна разная направленность, волнообразность, искривление (рис. 4.24, б-е). Средняя толщина пластин не превышает 1 мкм. Средний размер зерен в данной области варьируется в пределах от 9 до 10 мкм (табл.4.13).

- С – деформированный слой (глубина от 450 до 500 мкм), характеризующийся наличием тонких, вытянутых, одинаково ориентированных зерен(рис. 4.24, б).Средний размер зерен в данной области не превышает 15 мкм (табл.4.13);
- D – переходный слой между деформированным и недеформированным состоянием (глубина до 50 мкм) (рис. 4.24, б). Средний размер зерен в данной области варьиру-

ется в пределах от 15 до 18 мкм (табл.4.13). Данный слой разделяется строчной колонией перлита.



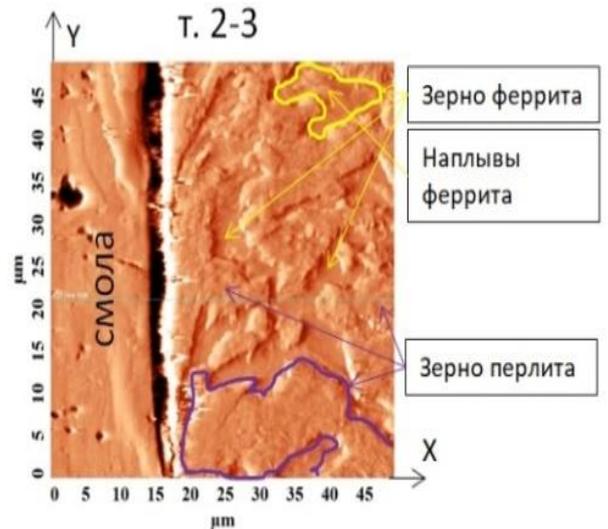
а)



б)



в)



г)

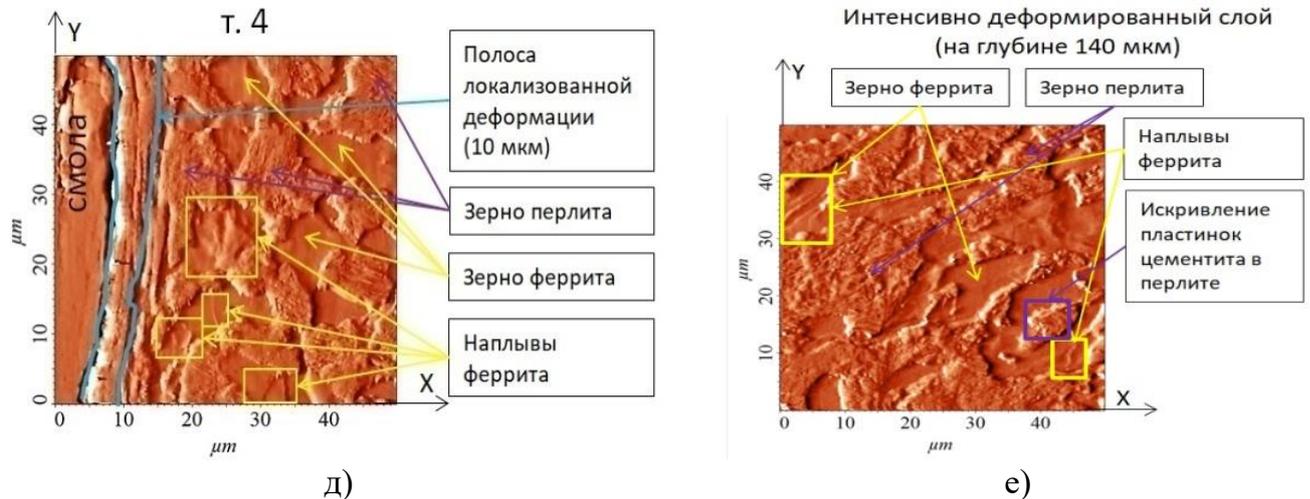


Рисунок 4.24 Структура стали 45 после ППД МР-роликом: а) При усилии 4750 Н, увеличение 200 крат ОМ-изображение; б) Схематическое изображение структуры стали 45 (АСМ скан-изображения) и распределение микротвердости после ППД МР-роликом с усилием 4750 Н; в) 2D скан-изображение в точке 1 (левый край); г) 2D скан-изображение в точке 2-3 (середина образца); д) 2D скан-изображение в точке 4 (правый край); е) 2D скан-изображение на глубине 140 мкм

Стоит отметить, что на глубине от 10 до 500 мкм можно наблюдать участки, где зёрна феррита имеют волнообразные наплывы (рис. 4.24, в-е). В зернах перлита наблюдается искривление цементитных пластинок, в свою очередь известно, что ориентация и геометрические параметры пластин цементита значительно влияют на локализацию деформаций, которые, в основном, возникают внутри зерен перлита или на границах между зерен перлита и феррита.

Таблица 4.13 Сравнительная таблица деформированного слоя и средние значение элементов структуры стали 45, при обработки МР-роликом с усилием 4750 Н

Характеристика деформированного слоя	Глубина деформированного слоя, мкм	Размер зерна феррита		Размер зерна перлита	
		ширина, мкм	высота, мкм	ширина, мкм	высота, мкм
Полоса локализованной деформации,	3-10	0,1-0,2	0,1-0,2	0,1-0,2	0,1-0,2
Интенсивно деформированный слой, мм	25-150	1-1,5	7-9	1,5-2	9-10
Деформированный слой, мм	450-500	5-15	5-12	8-17	6-30
Переходный слой, мм	50	8-11,5	13-15	10-12	15-18

Таким образом, обработка ППД МР-роликом образцов из стали 45 с усилием 4750 Н по сравнению с обработкой с меньшим усилием 3000 Н приводит к появлению значи-

тельного деформированного слоя (глубиной до 700 мкм), для которого характерно наличие вблизи свободного края поверхности полосы локализованной деформации (толщиной до 10 мкм).

Именно в данной зоне значения микротвердости достигают своих максимальных значений (до 437HV), при этом увеличение микротвердости можно наблюдать и на глубине до 3050 мкм. Также обработка с усилием 4750 Н приводит к измельчению структуры более чем в 3 раза, без разрушения поверхностного слоя детали. На рисунке 4.25 приведена линейная аппроксимации, показывающая зависимость параметров структуры стали 45 (размер зерен) от усилия обкатывания.

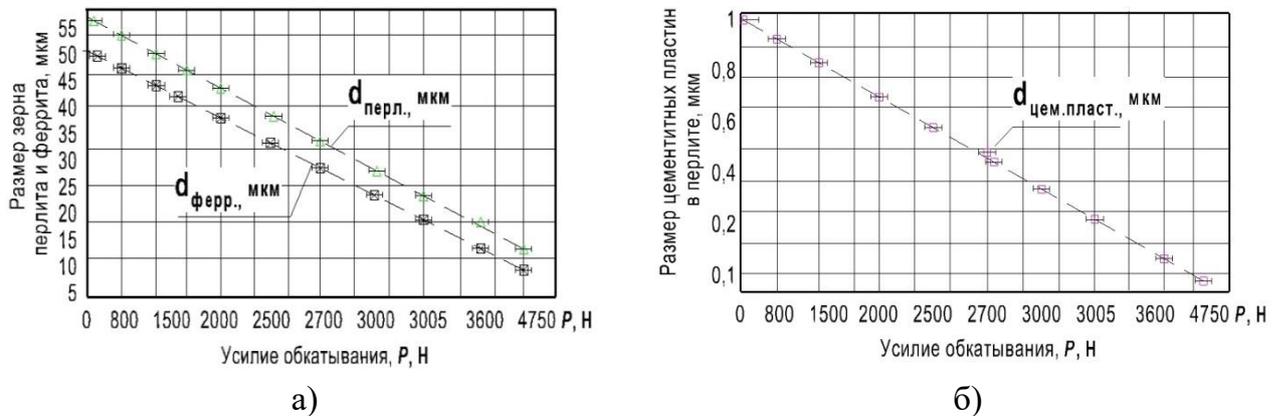


Рисунок 4.25 Аппроксимирующие линейные зависимости: а) размеров зёрен перлита и феррита ($d_{\text{перл.}}$, $d_{\text{ферр.}}$, мкм) от усилия обкатывания (P , Н); б) Размеров цементитных пластин в перлите ($d_{\text{цем.пласт.}}$, мкм) от усилия обкатывания (P , Н)

Зависимости размеров зёрен феррита ($d_{\text{ферр}}$) и перлита ($d_{\text{перл.}}$), а также цементитных пластин ($d_{\text{цем.пласт}}$) в перлите от усилия обкатывания выражаются формулами 4.6–4.8:

$$d_{\text{ферр.}} = -0,007 \times P[0,85] + 40,75; \quad (4.6)$$

$$d_{\text{перл.}} = -0,009 \times P[0,95] + 54,08; \quad (4.7)$$

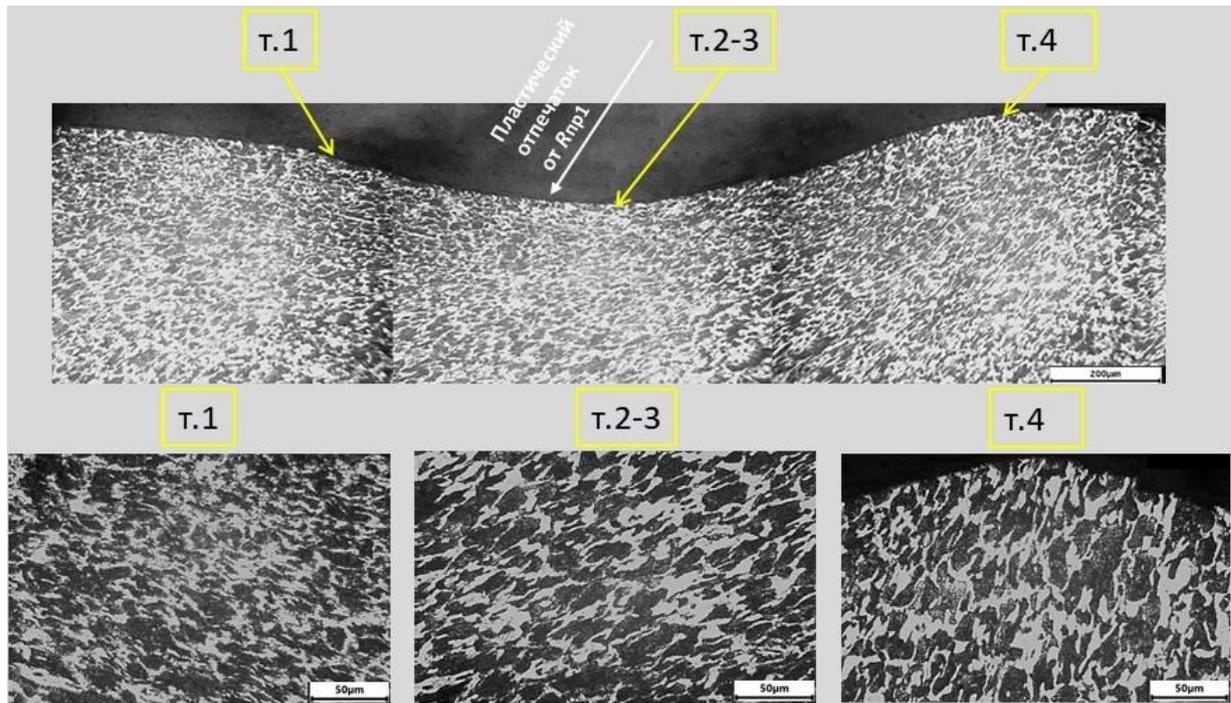
$$d_{\text{цем.пласт.}} = -0,0002 \times P[0,80] + 1,1. \quad (4.8)$$

Полученные зависимости показывают увеличение размеров зёрен при уменьшении усилия обкатывания в поверхностном слое, что не противоречит общепринятым представлениям, а также подтверждает ранее выдвинутую гипотезу о том, что обработка МР-роликом приводит к измельчению структуры, а усилие обкатывания является наиболее значимым технологическим фактором при выборе режима обработки.

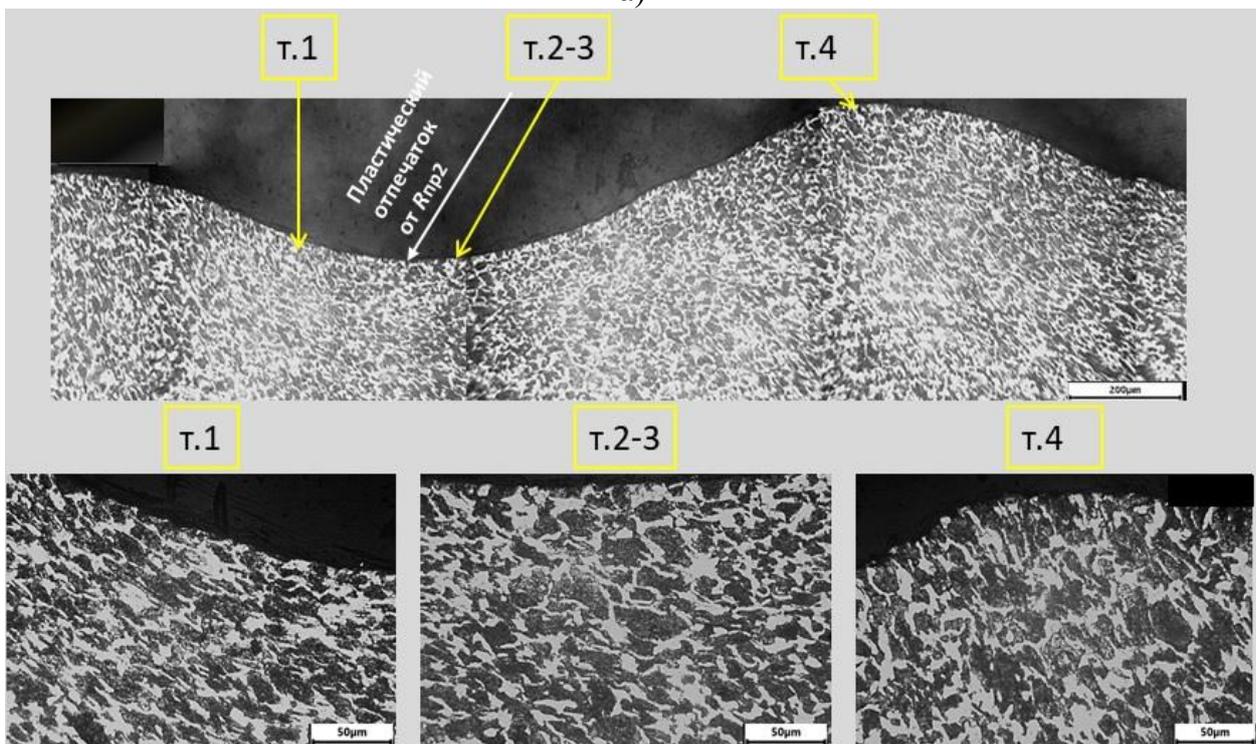
4.4.2 Исследование картины пластического течения металла в очаге деформации

Исследование картины пластического течения образца из стали 45, обработанного с усилием 4750 Н, методами ОМ, АСМ и РСА проходило в соответствии с методикой, представленной в главе 3.

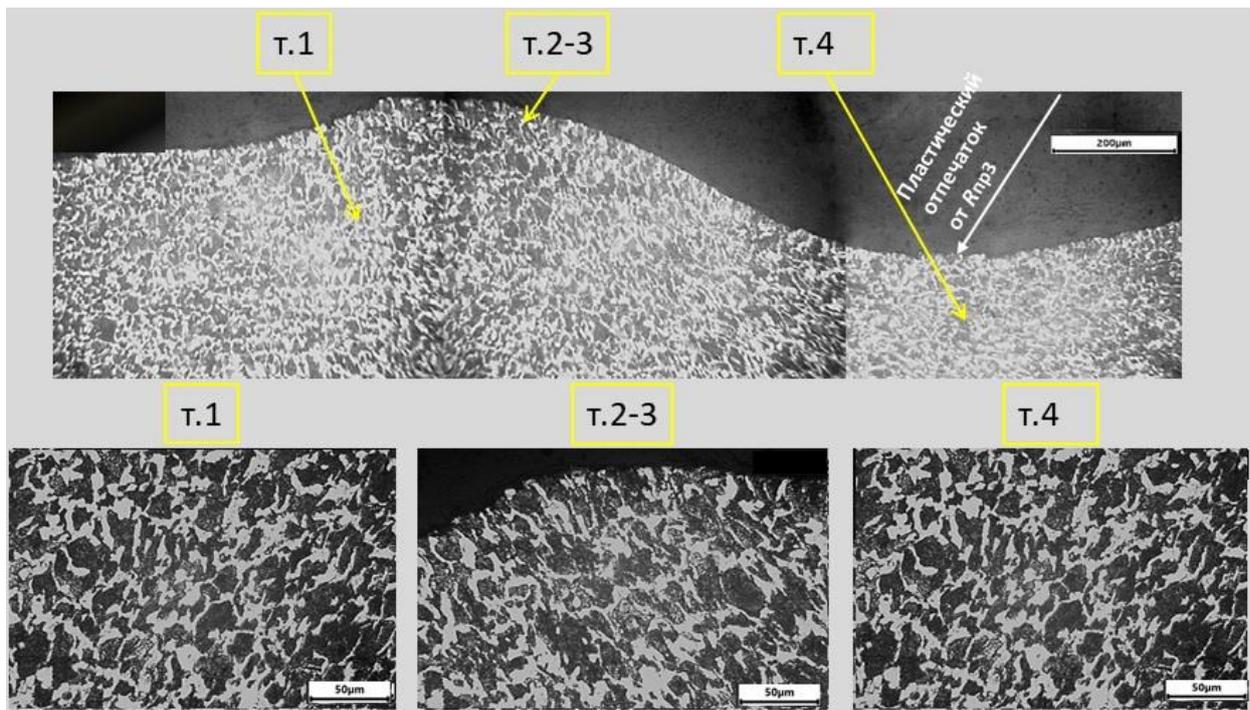
На рисунке 4.26 представлена структура образца, обработанного с усилием 4750 Н.



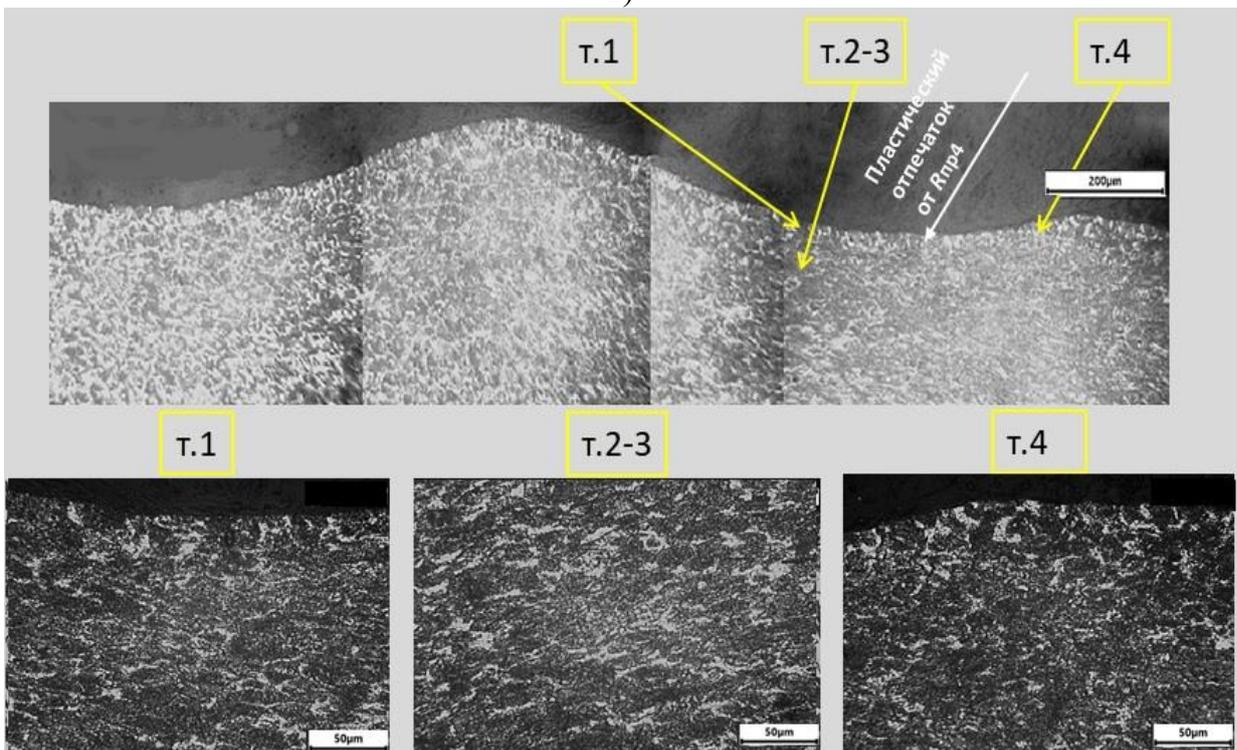
а)



б)



в)



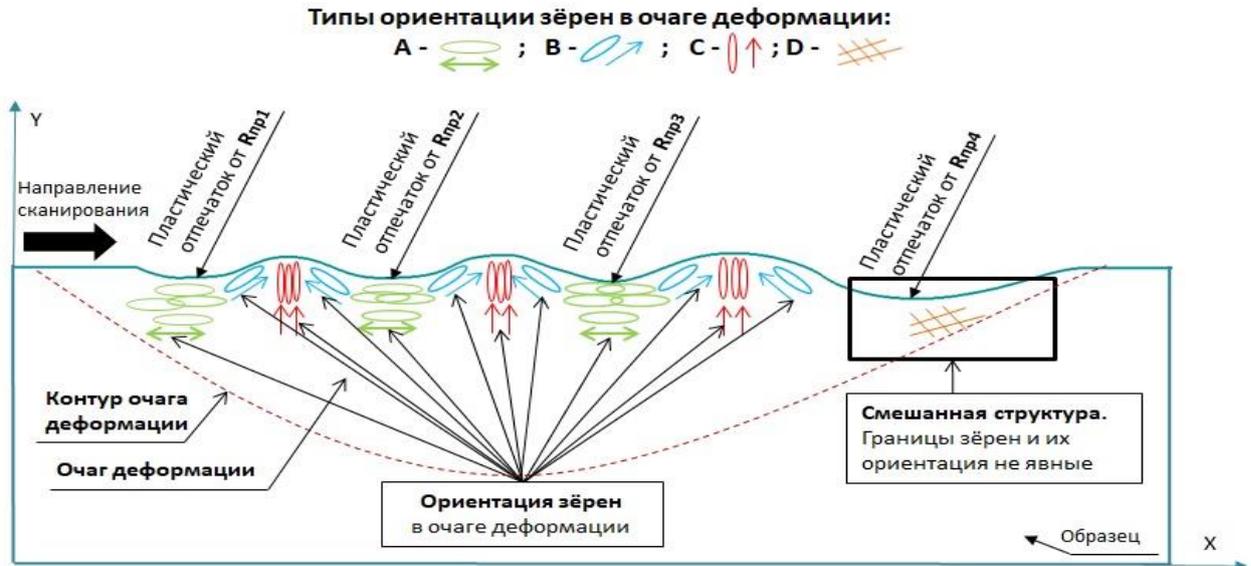
г)

Рисунок 4.26 Структура стали 45 в стационарном очаге деформации (усилие, 4750 Н), ОМ-изображения, увеличения 200 и 500 крат: а) пластический отпечаток от $R_{п1}$; б) пластический отпечаток от $R_{п2}$; в) пластический отпечаток от $R_{п3}$; г) пластический отпечаток от $R_{п4}$

Из рисунков 4.26-4.27 можно выделить четыре зоны, различающиеся характером протекания процессов пластического течения металла в очаге деформации, и как следствие типом ориентации зёрен с соответствующими характерными особенностями:

- А – зёрна горизонтально ориентированы, вытянуты, расположены на глубине до 200-230 мкм, в зоне контакта между поверхностями образца и инденторами МР-ролика. Значительные изменения ферритно-перлитной структуры, предположительно, обусловлено наличием высокоскоростной деформацией. В данных областях, ширина зёрен феррита варьируется в пределах от 3 до 8 мкм, высота зёрен феррита варьируется в пределах от 7 до 13 мкм. Ширина зёрен пластинчатого перлита варьируется в пределах от 5 до 9 мкм, высота зёрен пластинчатого перлита варьируется в пределах от 3 до 10 мкм.
- В – зёрна ориентированы под углом 30° , вытянуты, с характерной волнистостью расположены по глубине до 210-380 мкм, в зонах подъема и спада пластических волн от инденторов МР-ролика. В данных областях, ширина зёрен феррита варьируется в пределах от 2,5 до 25 мкм, высота зёрен феррита варьируется в пределах от 2,2 до 10 мкм. Ширина зёрен пластинчатого перлита варьируется в пределах от 4 до 24 мкм, высота зёрен пластинчатого перлита варьируется в пределах от 5 до 12 мкм.
- С – зёрна ориентированы вертикально, вытянуты, расположены по глубине до 200-250 мкм, в вершинах пластических волн, которые формируются впереди деформирующих инденторов МР-ролика. В данных областях, ширина зёрен феррита варьируется в пределах от 2 до 5 мкм, высота зёрен феррита варьируется в пределах от 3 до 18 мкм. Ширина зёрен пластинчатого перлита варьируется в пределах от 2,5 до 9 мкм, высота зёрен пластинчатого перлита варьируется в пределах от 3 до 22 мкм.
- D – в связи с тем, что в данной области (контактная поверхность под наибольшим профильным радиусом R_{pr4}) преобладает смешанная, дисперсная структура, характеризующаяся сложным и неоднородным строением, границы зёрен в данной зоне размыты и плохо читаемы, методом ОМ определить ориентацию зёрен и детально изучить не удастся. При исследовании данного методом АСМ выявлено наличие сильно вытянутых в направлении подачи зерен феррита и перлита, при этом для пластинок цементита в перлите характерна разная направленность, волнообразность, искривление, дробление.

Средняя толщина пластин не превышает 1 мкм. В данной области, ширина зёрен феррита варьируется в пределах от 1,5 до 3 мкм, высота зёрен феррита варьируется в пределах от 12 до 15 мкм. Ширина зёрен пластинчатого перлита варьируется в пределах от 8 до 20 мкм, высота зёрен пластинчатого перлита варьируется в пределах от 2,5 до 12 мкм. Именно в этой области преобладают наибольшие значения микротвердости (364-437HV).



а)

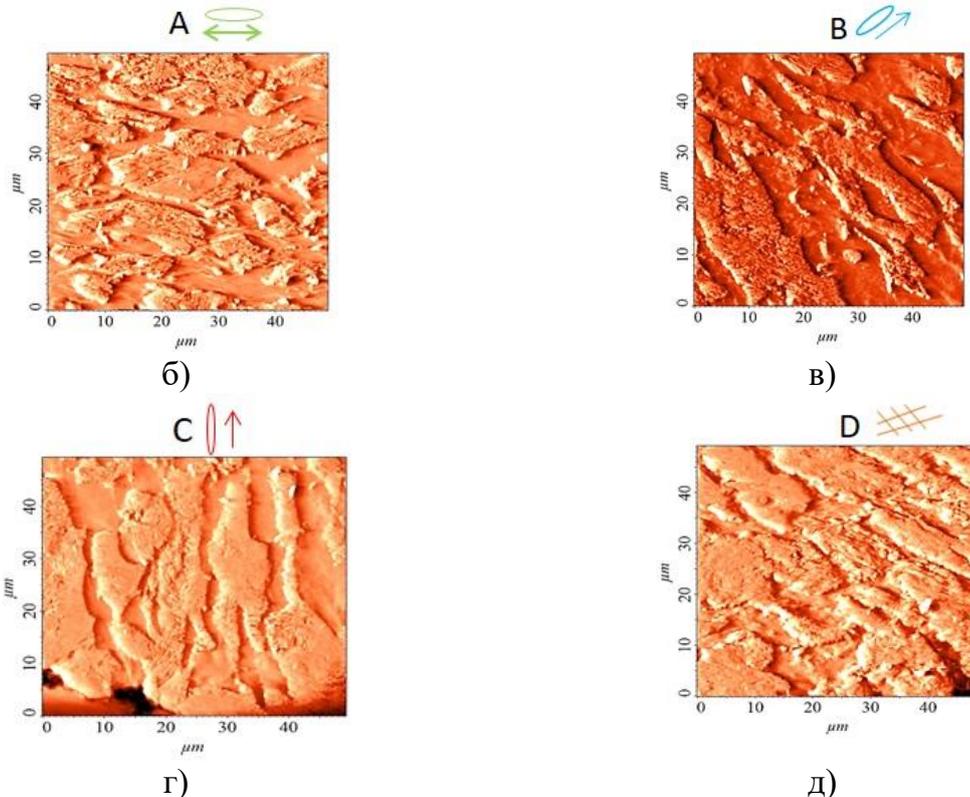
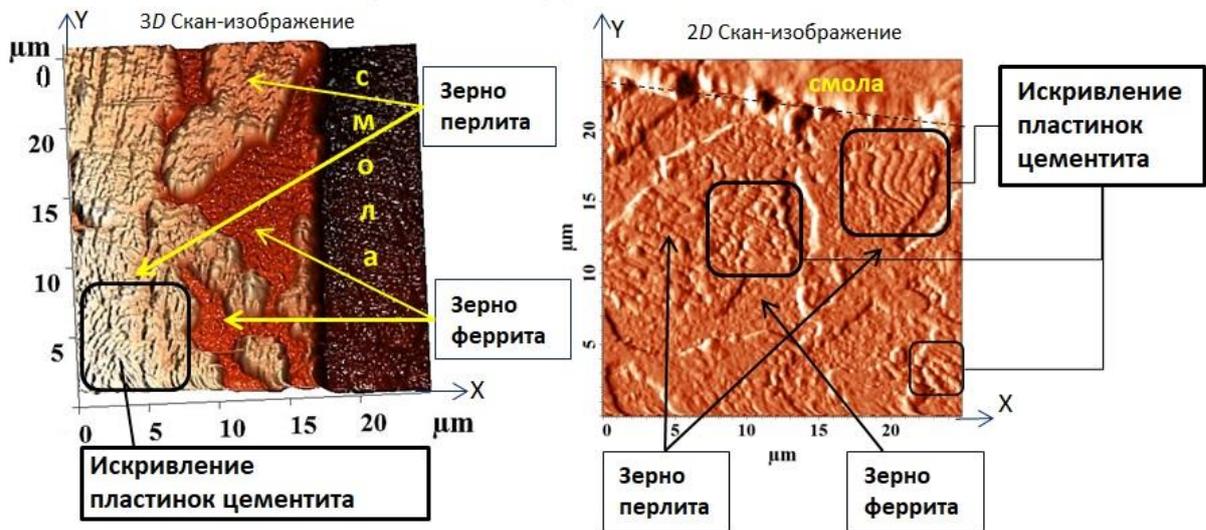


Рисунок 4.27 Схематическое изображение направлений ориентации зёрен в очаге деформации (усилие, 4750 Н) и 2D-скан-изображения структуры стали 45: А – зёрна горизонтально ориентированы; В – зёрна ориентированы под углом 30° ; С – зёрна ориентированы вертикально; D – зона смешанной, дисперсной структуры, характеризующаяся сложным и неоднородным строением

Известно, что в перлитной стали может наблюдаться первичная или вторичная фрагментации [281]. При первичной фрагментации структура пластин цементита в перлитном зерне при незначительном искривлении сохраняется (рис.4.28,а), в отличие от вторичной фрагментации, при которой происходит значительная фрагментация, разру-

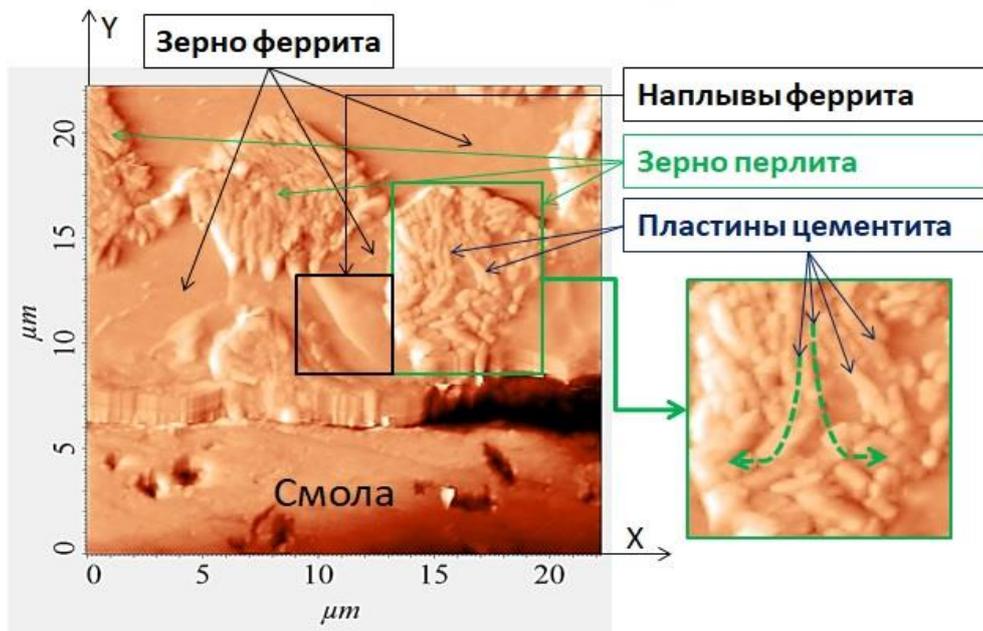
шение перлитных колоний (рис. 4.28,б). Такие участки представляют собой смесь зерен феррита и цементита. Пример таких участков представлен на рисунках 4.30, д и 4.31.

Первичная фрагментация



а)

Вторичная фрагментация



б)

Рисунок 4.28 Структура стали 45: а) Первичная фрагментация: 2D скан-изображение структуры стали 45 в очаге деформации (усилие, 3000 Н) б) Вторичная фрагментация: 2D скан-изображение структуры стали 45 в очаге деформации (усилие, 4750 Н)

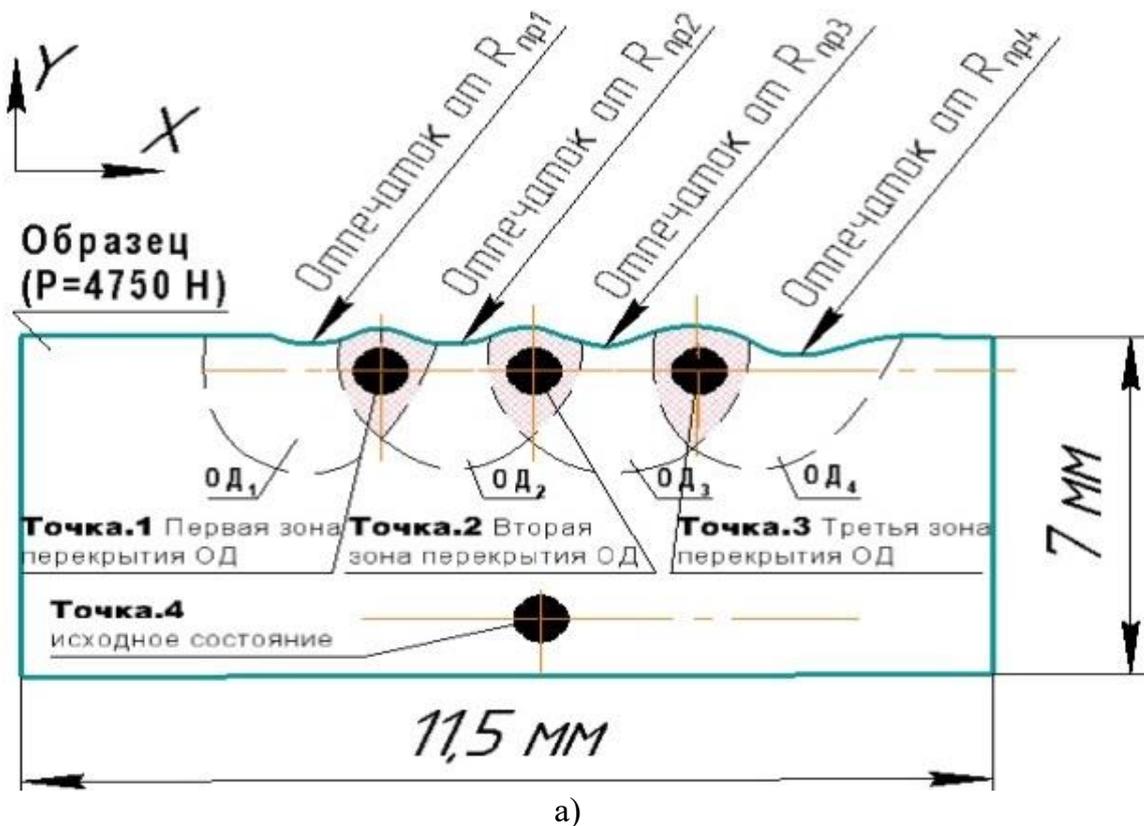
На рисунке 4.28 видно, что зерна пластинчатого перлита имеют особенности в виде искривленных и непараллельных друг другу пластинок цементита, имеющих различного типа сродки, а также участки феррита, разделяющие пластину цементита. Ча-

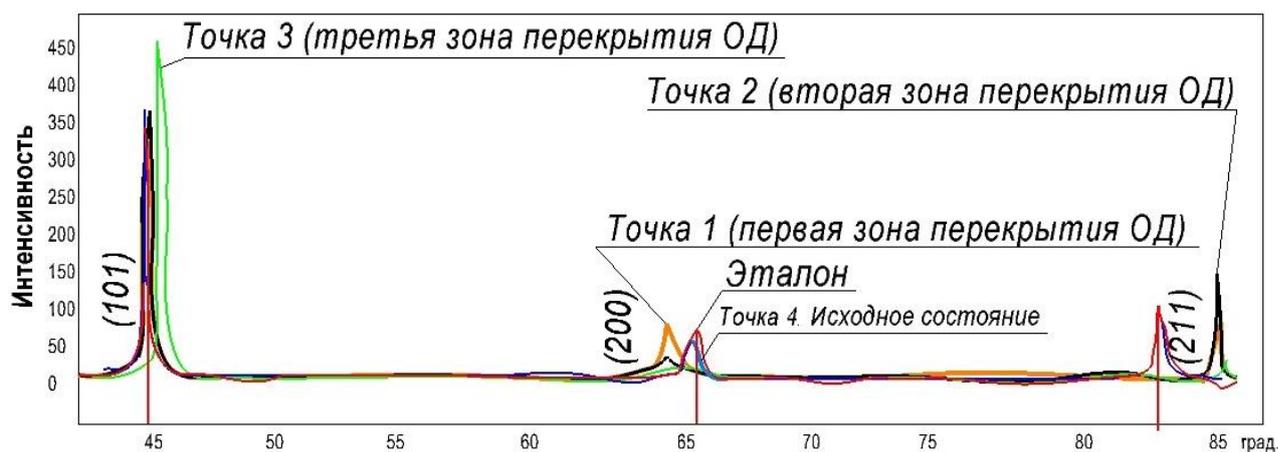
стицы цементита в виде коротки пластинок, относятся к зернам пластинчатого, высокодефектного перлита.

Стоит отметить, что различные отклонения от нормального строения феррита и цементита в зернах пластинчатого перлита и их расположения, обуславливают неоднородность механических свойств в локальных участках колоний перлита, что в свою очередь влияет на места зарождения зон локализации пластического течения металла, образования дефектов, трещин и др. Таким образом, приведённые результаты металлографических исследований образца из стали 45 с очагом деформации подтверждают гипотезу, приведённую во главе 2 о кинематике течения металла, при обработке ППД МР-роликом, и о возможности измельчения структуры.

Для анализируемого процесса характерен следующий механизм локализованной деформации – полосы локализованного течения, проходящие через множество зерен и колоний перлита.

На рисунке 4.29 (а, б) приведены фрагменты рентгеновских дифрактограмм образца обработанного с усилием 4750 Н.В исходном состоянии (рис. 4.29, в) значение параметра ОЦК кристаллической решетки α -Fe составляет $a = 0,28773\text{ нм}$. Дифракционные линии матричной фазы α -Fe узкие, что свидетельствует о низкой концентрации дефектов кристаллической решетки.





б)

Рисунок 4.29. Фрагменты рентгеновских дифрактограмм (SiK_{α}) 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

Анализ дифрактограммы на рисунке 4.29 (б) показал, что в точке 1 присутствует одна фаза – α -Fe. Анализируя положения рефлексов, можно сказать о присутствии отклонений, указывающих на изменения параметра решетки. ППД МР-роликом приводит к уменьшению параметра кристаллической решетки α -Fe ($a = 0,28729\text{нм}$ (табл.4.14). Анализ дифрактограммы на рисунке 4.29 (б) показал, что в точке 2 наблюдаются рефлексы-отражения от плоскостей фазы – α -Fe. Положения рефлексов отличаются от эталонных, что говорит об изменении параметров решетки исследуемого материала.

Параметр кристаллической решетки α -Fe также уменьшается и составляет $a = 0,28744\text{нм}$ (табл. 4.14). Анализ дифрактограммы на рисунке 4.29 (б) показал, что в точке 3 присутствует фаза – α -Fe. При этом смещение пиков в сравнении с эталонными положениями по оси углов 2θ указывает на изменение параметров решетки. Параметр кристаллической решетки α -Fe составляет $a = 0,28721\text{нм}$ (табл. 4.14). Определение таких параметров, как ОКР и микроискажения кристаллической решётки, необходимо для выявления механизмов упрочнения и закономерностей процессов, протекающих в объеме материала, а именно в зонах перекрытия очагов деформации, при ППД МР-роликом.

В таблице 4.14 приведены параметры кристаллической решетки, областей когерентного рассеивания и микродисторсии решетки исследуемого образца.

Таблица 4.14 Параметры кристаллической решетки, областей когерентного рассеивания и микродисторсии решетки исследуемого образца

Изменение межплоскостного расстояния, а, 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

Анализируя полученные значения в таблице 4.14, можно сказать, что для всех трех зон перекрытия очагов деформации характерно следующее: значительно уменьшается ОКР вследствие уменьшения размеров кристаллитов (до 40 нм), в тоже время микродисторсия кристаллической решетки значительно увеличивается (в 1,5-2,5 раза).

Такие изменения размеров кристаллитов (уменьшение) и микроискажений решетки (увеличение) не характерны для систем, подвергающихся нагреву, поскольку в этом случае должны уменьшаться микроискажения и расти размеры кристаллитов.

По-видимому, в данном случае это связано с непрерывным (квазипериодическим) изменением дефектной наноструктуры. Наблюдается снижение значения межплоскостного расстояния с 0,28773 до 0,28721 (точка №3, между $R_{пр3}$ и $R_{пр4}$ – в данной области, так же преобладает неоднородная, смешанная структура, обнаружена методом АСМ). Это может быть связано с высокой плотностью дислокаций, а также их перераспределением в теле и границах фрагментов.

В таблице 4.15 приведены результаты измерения уровня внутренних микронапряжений II рода по линиям плоскостей α -железа [110] и [211].

Сравнивая значения напряжений II рода с учетом упругой деформации кристаллической решетки и относительной микродеформации решетки для исследуемого образца можно сказать, что значение напряжений II рода после ППД МР-роликом увеличивается в результате неоднородной деформации, накопления значительных дефектов и измельчения структуры в зонах перекрытия.

Наибольший уровень внутренних микронапряжений II рода наблюдается в точке № 1, где возникает первая зона перекрытия ОД. Одновременно с этим, незначительно уменьшается относительная деформация кристаллической решетки до 1102 Мпа.

Таблица 4.15 Уровень внутренних микронапряжений II рода в исследуемом образце

Упругая деформация кристаллической решетки	Микродисторсии – относительная деформация кристаллической решетки		Остаточные напряжения второго рода, σ_{II} , МПа	
$\sigma_{реш} = E \cdot (\Delta a/a)$, МПа	$\sigma_{<\epsilon>} = E \cdot \beta \cdot ctg\theta$, МПа		σ_{II} , МПа	
после ППД МР-роликом	Неупрочненный слой, точка № 4	после ППД МР-роликом	Неупрочненный слой, точка № 4	после ППД МР-роликом
Точка № 1 Первая зона перекрытий ОД				
306	1114	1102	1114	1408
Точка № 2 Вторая зона перекрытий ОД				
202	1114	904	1114	1106
Точка № 3 Третья зона перекрытий ОД				
362	1114	930	1114	1292

4.5 Выводы по главе 4

1. Проведены экспериментальные исследования взаимосвязей режимов и качества поверхностного слоя после ППД МР-роликом, включая шероховатость, упрочнение, микроструктуру на разных масштабных уровнях, тонкую физическую структуру.

2. Впервые исследовано формирование геометрических параметров очага деформации для различных схем нагружения при ППД МР-роликами, имеющими разную геометрию рабочей части, в диапазоне натягов на деформирующие элементы от 0,05 до 0,15 мм и подач от 0,01 до 0,07 мм/об. Выявлено, что обработка с разными типами роликов приводит к формированию очагов деформации с осевыми размерами от 1,32 до 2,43 мм; пластическая деформация при этом распространяется на глубину от 1,0 до 3,5 мм. Для различных схем нагружения установлена последовательность работы деформирующих инденторов МР-роликов. Показано, что при радиальном внедрении с усилием 3000 Н (при выключенной подаче и вращении детали) и при радиальном внедрении (с выключенной подачей и включенным вращением заготовки, при усилении от 185 до 395 Н) последовательность внедрения инденторов МР-ролика; рассчитаны площади контактов эллиптических отпечатков от инденторов (от 2,40 до 5,07 мм); давление в центре эллипса для каждого отпечатка (от 726,97 до 1875 МПа); предполагаемая глубина упрочнения (от 3,9 до 4,4 мм). Полученные закономерности – граничные условия в виде геометрических профилей очагов деформации, – положены в основу решения задач КЭ-моделирования, расчета параметров механики и качества поверхностного слоя детали.

Полученные экспериментальные геометрические профили стационарных очагов деформации с точностью до 85% совпали с теоретическими профилями, что подтвердило корректность решения задач методом конечных элементов.

3. Экспериментальные исследования показали высокую эффективность обработки ППД МР-роликом для получения высокого качества поверхностного слоя деталей. В процессе обработки образцов из стали 45 высотные параметры шероховатости снижаются в сравнении с исходными в 1,5-2 раза и остаются на удовлетворительном для широкой номенклатуры деталей уровне. 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; R_{max} не более 2,75 мкм; W_{max} 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.

4. Выполнены экспериментальные исследования упрочнения поверхностного слоя образцов, изготовленных из пластичного материала армо-железо и конструкционной стали 45. Показано, что микротвердость поверхностного слоя деталей из армо-железа увеличивается в 1,5 раза (до 162 HV), микротвердость отожженной стали 45 до 360-445 HV ; глубина упрочнения увеличивается в 2,5-3 раза по сравнению с деформированием традиционными торовыми инструментами с идентичными профильными радиусами роликов. Проведенный анализ распределения микротвердости поверхностного слоя образцов из стали 45 показал, что максимальные значения микротвердости (360-445 HV) можно наблюдать в зонах очага деформации, расположенных под свободными полостями МР-ролика; это подтверждает ранее выдвинутую научную гипотезу о обеспечении высокого гидростатического давления в очаге деформации за счет создания сложного напряженно-деформированного состояния сложнопрофильными инструментами.

5. Впервые методами оптической металлографии, атомно-силовой микроскопии и рентгеноструктурного анализа исследована картина 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. В этих же зонах перекрытия очагов деформации методом рентгеноструктурного анализа установлено: наличие значительных остаточных напряжений второго рода (σ_{II} , от -1106 до -1408 МПа); увеличение микродисторсии кристаллической решетки ($\langle \varepsilon^2 \rangle^{1/2}$, 10^{-3} от 1,6 до 2,2); уменьшение ОКР (D , нм, с 71 до 40 нм,) уменьшение межплоскостного расстояния (a , Å с 0,28773 до 0,28721). Такие изменения размеров кристаллитов (уменьшение) и микроискажений решетки (увеличение) не характерны для систем, подвергающихся нагреву, поскольку в этом случае должны уменьшаться микроискажения и расти размеры кристаллитов. В данном случае это связано с непрерывным (квазипериодическим) изменением дефектной наноструктуры.

6. Рентгеноструктурный анализ образцов из стали 45, обработанных с усилием 4750 Н, по сравнению с обработкой с меньшим усилием 3000 Н приводит к появлению значительного деформированного слоя (глубиной до 700 мкм), для которого характерно наличие вблизи свободного края поверхности полосы локализованной деформации (толщиной до 10 мкм). Именно в данной зоне значения микротвердости достигают своих максимальных значений (до 437HV), при этом увеличение микротвердости можно наблюдать и на глубине до 3050 мкм. Установлено, что такая обработка приводит к измельчению структуры более чем в 3 раза в сравнении с исходным состоянием без разрушения поверхностного слоя детали.

7. Результаты экспериментальных исследований позволили сформировать рекомендации по выбору геометрии и действительных натягов для инденторов МР-ролика:

- МР-ролик (тип 1, с меньшими натягами от 0,01 до 0,05 мм), что соответствует усилию 2500 Н, следует использовать тогда, когда требуются равномерное распределение упрочнения, высокие значения поверхностной микротвердости (до 360HV) и большая глубина упрочнения (до 3,0 мм) с размером зерна металла 15-20 мкм;
- МР-ролик (тип 2, с большими натягами от 0,05 до 0,15 мм), что соответствует усилию 4750 Н, следует использовать тогда, когда необходимо сформировать гетерогенную структуру с мелким зерном (9-13 мкм). Это позволяет создавать зоны с высоким гидростатическим давлением, а также большой глубиной упрочнения (до 4,0 мм и более) при гарантированном отсутствии разрушения поверхностного слоя детали.

5. ПРОМЫШЛЕННАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

В результате проведенных экспериментально-аналитических исследований установлены взаимосвязи формирования геометрических параметров очага деформации и качества поверхностного слоя при обработке ППД МР-роликом; выявлены физические закономерности накопления деформации и исчерпания запаса пластичности металлом поверхностного слоя, излучаемого в процессе обработки.

Полученные закономерности положены в основу решения задач моделирования и расчета параметров механики металла поверхностного слоя детали. Использование полученных результатов позволяет назначать рациональные режимы обработки, обеспечивающие требуемое качество поверхностного слоя и циклическую долговечность детали. Для этого необходимо решить задачу расчета накопленных деформаций, исчерпания запаса пластичности металла и качества поверхностного слоя детали в зависимости от параметров режима обработки. С этой целью была разработана методика позволяющая по режимам обработки решать задачу прогнозирования долговечности и качества поверхностного слоя, как в процессе изготовления, так и эксплуатации изделия. Для решения прямой (инженерно-технологической) и обратной (эксплуатационной) задачи обеспечения циклической долговечности была использована структурная модель представленная в главе 2. Решение прямой задачи позволяет по заданным параметрам режима обработки ППД МР-роликом определить параметры качества, накопленные параметры механического состояния поверхностного слоя, а также циклическую долговечность детали. Решение обратной задачи позволяет по заданным значениям параметров долговечности определить режим обработки ППД МР-роликом, обеспечивающий необходимое качество поверхностного слоя.

5.1 Методика решения прямой, (инженерно-технологической) и обратной (эксплуатационной) задачи с использованием наследственных статистических зависимостей

5.1.1 Решение прямой (инженерно-технологической) задачи

При решении прямой (инженерно-технологической) задачи исходными данными являются:

- чертеж изделия; размер изделия; исходная шероховатость поверхности; материал изделия, характеризуемый исходной твердостью HV, кривой течения материала и диаграммой пластичности в виде $\Lambda = \Lambda(\Pi)$;
- режим обработки, характеризуемый: диаметром МР-ролика, D_p , мм; количеством деформирующих элементов МР-ролика, $K_{дэ}$, шт.; величиной профильных радиусов МР-ролика, $R_{пр}$, мм; величиной действительного натяга МР-ролика, h_d , мм; подачей, S , мм/об; частотой вращения шпинделя, n , об/мин.

Ниже приведен пример решения прямой задачи (табл. 5.1, рис. 5.1). Предположим, что осуществляется обработка ППД МР-роликом предварительно обработанной резанием до $\varnothing 40$ мм заготовки из стали 45 (исходная твердость 170 HV) при следующих значениях технологических факторов: $D_p = 60$ мм; $n = 1000$ об/мин; $S = 0,07$ мм/об; $R_{пр1,2,3,4} = 1; 1; 1; 3$ мм; $h_d = 0,05; 0,1; 0,15; 0,05$ мм.

Прямая (инженерно-технологическая) задача решается в следующей последовательности.

1. По известным моделям в зависимости от заданных режимов рассчитываются геометрические параметры очага деформации. Диаметр ролика назначается из условий требуемого пятна контакта [83].
2. Производится построение профиля очага деформации (рис. 5.1. табл. 5.2).
3. Выполняется конечно-элементное моделирование (МКЭ) процесса ППД МР-роликом, в результате которого получают распределения компонент тензоров напряжений и деформаций в очаге деформации.

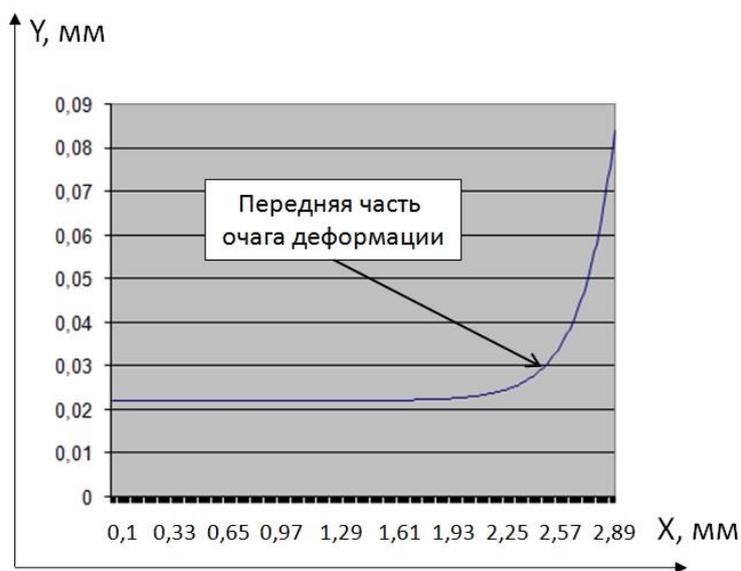


Рисунок 5.1 Графическое изображение передней части очага деформации

4. Далее по методике В. Ю. Блюменштейна, А. А. Кречетова, с помощью программы для ЭВМ «Наследственная механика поверхностного слоя деталей машин» выполняется импорт результатов конечно-элементного моделирования и рассчитываются координаты линий тока в очаге деформации, определяются параметры НДС и рассчитываются значения показателей механического состояния вдоль этих линий тока [268]. На рисунке 5.2 приведен фрагмент таблицы результатов расчета.

№ линии тока	Показатели механического состояния поверхностного слоя						
	ξ_x	ξ_y	ξ_{xy}	П	Н	Λ'	Λ
1	0,003704	-0,00148	-0,000922	-0,99683	0,00411	0,0000712	1,0470
1	0,007407	-0,0037	-0,00741	-0,97533	0,000742	0,0000583	1,1162
1	-0,00077	-0,000781	-0,0037	-0,99381	0,00054	0,00003	1,1617

Рисунок 5.2 Фрагмент таблицы с результатами расчета показателей механического состояния вдоль 1 линии тока

5. Производится расчет механического состояния поверхностного слоя: определяется значение Ψ на поверхности детали с учетом технологической наследственности; рассчитывается распределение Λ и Ψ по глубине поверхностного слоя. Расчет вдоль линии тока, формирующей поверхностный слой, привел к следующим результатам: степень деформации сдвига $\Lambda = 0,64$, степень исчерпания запаса пластичности $\Psi = 0,7$. Полученные значения деформационных параметров являлись начальными для решения задачи наследственной механики ППД в постановке, изложенной в главе 2.

6. Производится расчет параметров качества поверхностного слоя (табл. 5.1). Важно отметить, что режим ППД МР-роликом назначали исходя из необходимости выполнения упрочняюще-чистового обкатывания роликовым инструментом с максимальной производительностью процесса (табл. 5.1): $P=450$ кг; $n=630$ об/мин; $S=0,07$ мм/мин.

Таблица 5.1 Режимы ППД МР-роликом

Параметры обкатывания	Величина	Размерность	Параметры очага деформации	Величина	Размерность
№ опыта	1	шт.	Действительный натяг	0,05; 0,1; 0,015; 0,05	мм
Частота вращения	630	об/мин	Высота волны	0,732	мм

Усилие обкатывания	450	кг	Расчетный натяг	0,754	мм
Подача	0,07	мм/об	проекция пе- ред.дуги	5,170	мм
Диаметр детали	40	мм	проекция зад- ней дуги	0,965	мм
Диаметр ролика	60	мм	delta	0,013	мм
Профильный радиус	1; 1; 1; 3	мм	lm	8,685	мм
Шерох-ть до обработ- ки.	6,3	мкм	lb	13,855	мм
Шерох-ть обкат. пов-ти.	0,24	мкм			
Твердость до обработ- ки.	170	ед			
Твердость обкат. пов-ти.	324	ед			
Глубина упрочнения.	3,182	мм			
Степень упрочнения.	30	%			

7. Выполняется расчет и строятся графики распределения компонент тензора остаточных напряжений проводился по глубине упрочнения поверхностного слоя. При этом, значение предела текучести при сдвиге определяется по распределению твердости после ППД (глава 2). На рисунке 5.3 приведены эпюры компонент тензора остаточных напряжений, построенные с учетом технологического наследования.

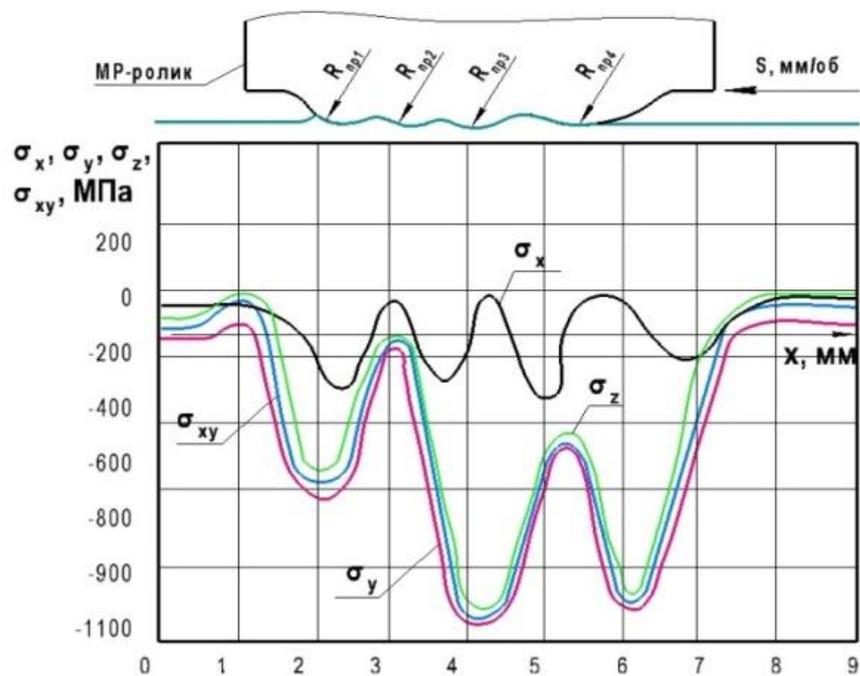


Рисунок 5.3 Эпюры компонент тензора остаточных напряжений с учетом наследуемых свойств поверхностного слоя детали

8. По методике В. Ю. Блюменштейна [83], рассчитывается циклическая долговечность (ЦД), которая определяется механическим состоянием поверхностного слоя.

Методика представлена программой-макросом, встроенной в табличный редактор *Excel* и реализуемой в несколько этапов:

8.1 Выполняется расчет параметров стадии циклической долговечности:

- определяется величина степени деформации сдвига (СДС), накопленной на стадии ЦД: $\Delta\Lambda_{цд} = 1,738$;

- определяется глубина зарождения усталостной трещины (5.1):

$$h_{тр} = 0,002 \times \exp(3,7 \times 1,738) = 1,241 \text{ (мм)}; \quad (5.1)$$

8.2 Рассчитывается суммарная степень упрочнения поверхностного слоя, соответствующую моменту зарождения усталостной трещины (5.2):

$$\delta_{цд} = 1,5 + 0,042 \times 1,738 = 1,573; \quad (5.2)$$

8.3 Рассчитывается длительность стадии ЦД (5.3):

$$N_{цд} = (4,02 \times 10^{-11}) \times \exp(16,16 \times 1,573) = 4,404 \text{ млн. циклов.} \quad (5.3)$$

5.1.2 Решение обратной (эксплуатационной) задачи

При решении обратной (эксплуатационной) задачи по заданной долговечности определяется структура технологического процесса, а также режим обработки ППД МР-роликом. Выполним расчеты для вала, изготавливаемого в условиях ООО «Завод «МашСервис»», используя результаты экспериментальных исследований Блюменштейна В. Ю. [83].

Дано: деталь - вал (рис. 5.4) $D_d = 75$ мм, материал - сталь 45 (ГОСТ 1050-2013, исходная твердость HV 160-180), амплитуда напряжений от внешней нагрузки многоциклового усталостного нагружения составляет $\sigma_a = 280$ МПа, циклическая долговечность $N_{ц.д.} = 5000000$ циклов. Для такого уровня циклической долговечности характерны: степень деформации сдвига, $\Lambda \sim 0,51$ и степень исчерпания запаса пластичности, $\psi \sim 0,54$. Требуется определить структуру технологического процесса механической обработки и, соответственно, режимы обработки ППД МР-роликом. В качестве исходной заготовки принимаем сталь 45 (ГОСТ 1050-2013 диаметром $D_{заг} = 80$ мм.

В существующем технологическом процессе предварительная точность и шероховатость поверхностей «1» (рис. 5.4) под хромовое покрытие обеспечивается шлифованием, что, во-первых, малопроизводительно, а во-вторых, не обеспечивает полного сцепления покрытия и поверхности детали, что вызывает его отслоение и, как след-

ствие, интенсивный износ детали, отрицательно сказываясь на эксплуатационных характеристиках изделия.

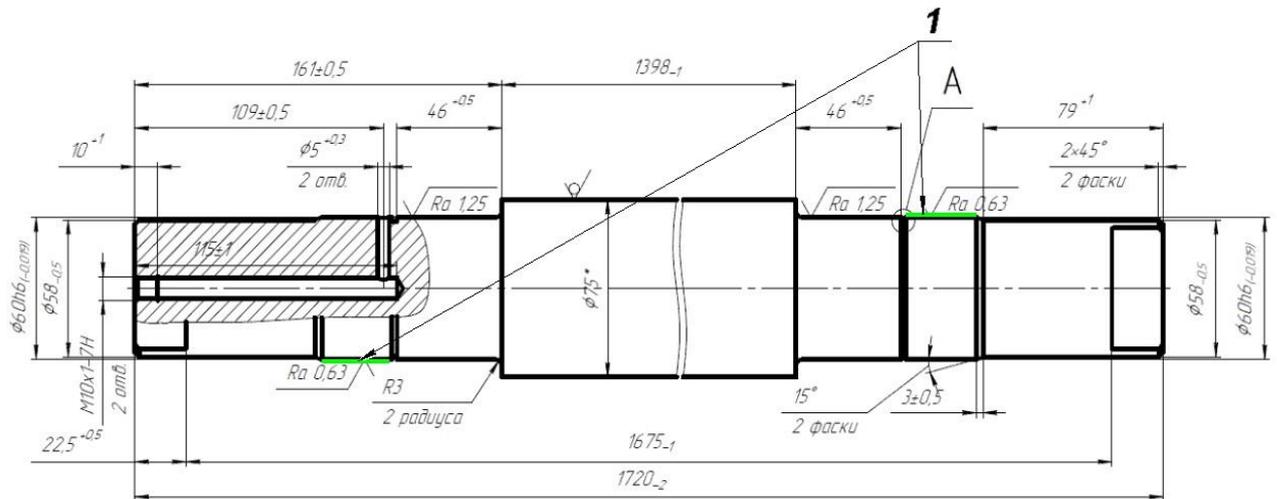


Рисунок 5.4 Фрагмент чертежа вала, изготавливаемого в условиях ООО «Завод «Маш-Сервис»»: 1 – поверхности под ППД МР-роликом

В качестве проектного технологического процесса был принят существующий на предприятии (базовый) технологический процесс, изменённый таким образом, что токарные операции №010, №015 и №030 совмещаются; шлифовальные №035, №040 и полировальная №045 операции заменены на операцию ППД МР-роликом (табл. 5.2).

Таблица 5.2 Базовый и проектный варианты технологического процесса

Базовый	Проектный
005 Фрезерно-центровальная	005 Фрезерно-центровальная
010 Токарная	010 Токарная
015 Токарная	
020 Фрезерная	015 Фрезерная
025 Сверлильная	020 Сверлильная
030 Токарная	
035 Шлифовальная	025 ППД МР-роликом
040 Шлифовальная	
045 Полировальная	

Назначаем структуру ТП:

Обработка резанием: инструмент - резец, оснащенный пластиной из твердого сплава ВК3: задний угол $\alpha=9^\circ$; передний угол $\gamma=10^\circ$; угол наклона главной режущей части $\lambda=0^\circ$; главный угол в плане $\varphi=45^\circ$; вспомогательный угол в плане $\varphi_1=30^\circ$; применялась СОЖ – масло индустриальное «20». Режим: $n = 1600$ об/мин; $S = 0,2$ мм/об. Суммарный припуск на сторону составляет: $(80-75)/2=2,5$ мм. Обработка проводится за 3

рабочих хода с толщинами срезаемого слоя, t , мм: $t_1 = 1,5$ мм; $t_2 = 0,75$ мм; $t_3 = 0,25$ мм.

Обработка поверхностным пластическим деформированием МР-роликом: обкатывание роликовым инструментом по режиму: $P=1500$ Н; $S=0,1$ мм/об; $n=630$ об/мин.

Во время 1 рабочего хода резание проводится по неупрочненному материалу. После обработки глубина упрочнения составила 0,56 мм. Второй рабочий ход выполняется с толщиной срезаемого слоя, превышающей глубину упрочнения после первого рабочего хода. После второго рабочего хода глубина упрочнения составила 0,31 мм. Третий рабочий ход осуществляется с толщиной срезаемого слоя, меньшей, чем глубина упрочнения после второго рабочего хода. Итоговое значение глубины упрочнения после обработки на операции резания составило 0,09 мм. Расчет деформационных параметров проводился по алгоритму, описанному выше. В поверхностном слое произошло накопление степени деформации сдвига и исчерпание запаса пластичности до уровня: $\Lambda \sim 0,12$, $\psi \sim 0,08$. При деформации с промежуточной термообработкой происходит уменьшение поврежденности вследствие залечивания деформационных дефектов [83]. При $0 < \psi < 1$ происходит полное устранение всех деформационных дефектов и восстановление запаса пластичности. В этом случае следующее нагружения поверхностного слоя буде проводиться по неупрочненному металлу.

При отсутствии термической обработки после операции резания, деформационные параметры для стадии ППД МР-роликом составляют: $\Lambda_{\text{ппд}} = 0,51 - 0,12 = 0,39$; $\psi_{\text{ппд}} = 0,54 - 0,08 = 0,46$. Для указанных значений режима ППД МР-роликом проводится расчет геометрических параметров очага деформации и оценка деформационных параметров по накопленному углу наклона касательной к профилю очага деформации: $\Lambda_{\text{ппд}} = 0,28$. Видно, что выбранный режим ППД МР-роликом не обеспечил требуемое значение степени деформации сдвига. Проводится изменение режима; указанные значения деформационных параметров достигаются на режиме обкатывания: $P=4500$ Н; $S=0,05$ мм/об; $n=630$ об/мин.

Выполняется проверка достоверности по критерию циклической долговечности, для чего проводится полный расчет тензора остаточных напряжений после обработки ППД, показателя схемы, релаксации тензора остаточных напряжений в процессе циклического нагружения, построение программы нагружения и оценка накопленной степени деформации сдвига и СИЗП.

Выбранные значения режима ППД обеспечили циклическую долговечность, равную $N_{ц.д.} = 5400000$ циклов при степени деформации сдвига, $\Lambda \sim 0,57$ и степень исчерпания запаса пластичности, $\psi \sim 0,52$.

Далее проводится назначение нового режима ППД, вычисление всех параметров стадии циклической долговечности и проверка достоверности вычислений. После двух итераций итоговое значение режима ППД составило: $P=4700$ Н; $S= 0,07$ мм/об; $n=630$ об/мин. Блюменштейн В. Ю. обрабатывал анализируемую серию образцов по режиму ППД, равному: $P=3000$ Н; $S= 0,07$ мм/об; $n=630$ об/мин; ролик традиционной торовой формы, $R_{пр}=2,5$ мм. Сравнение деформационных параметров, рассчитанных по профилограмме реального очага деформации, полученного Блюменштейна В. Ю. в результате экспериментальных исследований, и очага деформации, полученного расчетным путем, показало достаточно высокую сходимость при величине относительной ошибки не более 8 %.

5.2. Рекомендации по выбору/конструированию и области применения обработки мультирадиусными деформирующими инструментами

Исследования позволили разработать рекомендации по выбору основных конструктивных элементов и установить области рационального применения таких инструментов. Как было отмечено, мультирадиусный ролик – это деформирующий инструмент, обеспечивающий глубокое проникновения пластической деформации и высокий упрочняющий эффект в материале поверхностного слоя.

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. Это означает, что обратное пластическое течение от первого индентора должно перекрываться пластической волной, возникаю-

щей перед вторым индентором и т.д., обеспечивая непрерывность и стационарность пластического течения металла в суммарном очаге 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). Проводится прорисовка контуров каждого из четырех очагов деформации; затем эти контуры последовательно пристраиваются друг к другу. 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 торovým 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 торovým 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 2 000-2 500 Н. Это обеспечивает равномерное распределение упрочнения, высокие значения поверхностной микротвердости (до 360HV) 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.

Материал деформирующего инструмента – закаливаемые стали 40Х, ШХ15, ХВГ, У8-У10 и другие, обеспечивающие твердость рабочей части порядка 62-65 HRCэ.

Обрабатываемые материалы: пластичные мало- и среднеуглеродистые стали, а также стали в исходном состоянии с содержанием углерода до (0,6-0,7) %. В рамках работы проведена успешная апробация обрабатываемости МР-роликом деталей из стали 30ХГСА и 12Х18Н10Т. Из стали 30ХГСА изготавливаются детали силовой гидравлики

(штоки, цилиндры, золотники и др.); нержавеющая сталь 12Х18Н10Т используется при изготовлении валов и втулок вентиляционных насосов. Тестовые испытания показали возможность обеспечения высокого качества поверхностного слоя исходя из требований конструкторской документации и жестких условий работы цилиндров силовой гидравлики как при статическом нагружении в условиях растяжения, сжатия и кручения, так и динамическом (циклическом), связанным с колебаниями горного давления. Обработка длинных валов должна проводиться при использовании люнета (люнетов), обеспечивающих требуемую жесткость. Обработка тонкостенных втулок проводится на оправках; глубина упрочнения не должна превышать половины толщины стенки.

В рамках данной работы не проводились исследования по обработке деталей с покрытиями. Тем не менее, можно рекомендовать проводить обработку таких деталей, обеспечивая совместную пластическую деформацию достаточно пластичного покрытия и основы при сравнительно небольшой толщине покрытия (до 0,5-0,8 мм). При обработке сравнительно твердых покрытий большей толщины обработка проводится на режимах, обеспечивающих проникновение пластической деформации только в пределах самого покрытия.

5.3 Апробация результатов работы в промышленности

В рамках работы установлен ряд технологических закономерностей при обработке МР-роликом деталей из конструкционной стали 45. Как было показано в главе 1, подобные закономерности имеют место и для других конструкционных сталей. Тем самым, автор полагает, что полученные теоретические и экспериментальные результаты, будут применимы при разработке технологических рекомендаций при изготовлении и (или) восстановлении изделий из других конструкционных сталей. Подтверждением этому служат результаты моделирования, позволившие выполнить расчет тензорных характеристик механического состояния металла поверхностного слоя. При этом сами результаты зависят только от схемы нагружения, а накопленные деформации и отсутствие разрушения определяются пластическими свойствами металла.

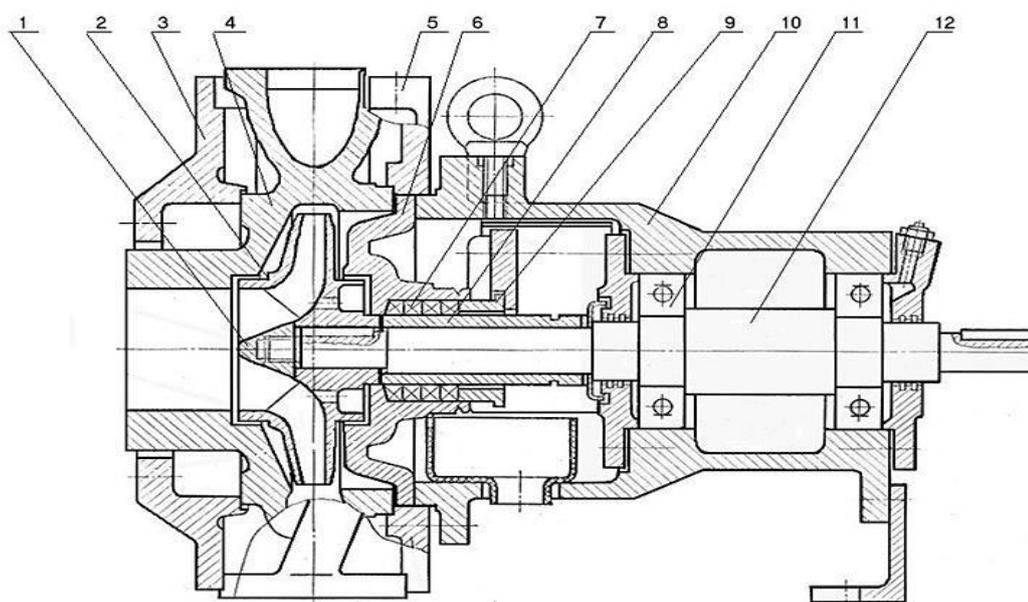
Апробация результатов работы на примере технологического процесса восстановления защитной втулки центробежного одноступенчатого консольного насоса группы ХИ (химические насосы) с осевым подводом жидкости с рабочим колесом закрытого типа (ООО «Завод «МашСервис»», г. Кемерово). Агрегат электронасосный типа «Х» со-

стоит из насоса, электродвигателя и щитка ограждения, смонтированных на общей плите из профиля. Привод насоса осуществляется через соединительную упругую муфту. Щиток ограждения служит для защиты обслуживающего персонала от вращающихся частей (рис. 5.5). Технические характеристики насоса приведены в таблице 5.3.

Таблица 5.3 Технические характеристики насоса

Типо-размер насоса	Подача, куб. м/час	Мощность насоса на воде, кВт	Материал защитной втулки	Вид уплотнения	Тип и обозначение уплотнения
ХО 50-32-125	от 8 до 12	5,68	12Х18Н9Т-6 ГОСТ 5949-2018	Сальниковое	Двойное (СД)

Хотя корпус насоса допускает значительные давления внутри корпуса, и соответственно допускается достаточно высокое давление на входе насоса, в типовые уплотняющие элементы насосов вносят дополнительные ограничения. Как правило, одинарный и двойной мягкий сальник допускают давление на входе в насос до $3,5 \text{ кгс/см}^2$, а утечка через уплотнение не более $2,0 \times 10^3 (2) \text{ куб. м/час}$. Детали проточной части изготавливают в основном из дорогостоящих марок стали и сплавов, к которым относятся: стали 12Х18Н10Т, 10Х17Н13М3Т, 06ХН28МДТ; сплавы ХН65МВ, Н70МВФ. Известно, что в большинстве случаев насосы выходят из строя вследствие износа нагруженных деталей (втулок, валов и др.) в результате их контакта с резинометаллическими подшипниками и жидкостью, проходящей через элементы электронасоса.



а)



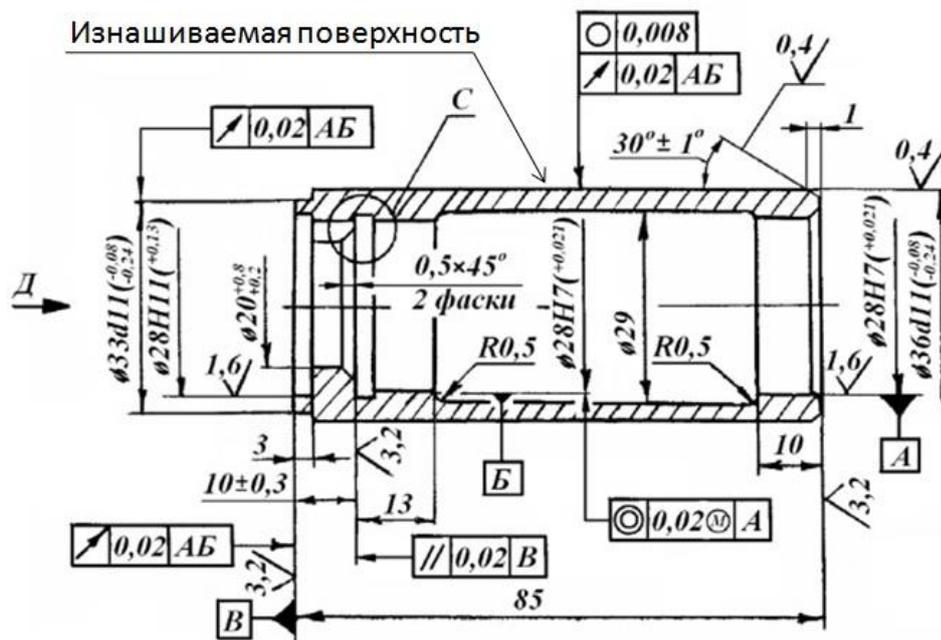
б)

Рисунок 5.5 Агрегат электронасосный типа «Х»: а) схема механизма центробежного насоса (разрез насоса типа Х), основные детали: 1 – гайка рабочего колеса; 2 – колесо рабочее; 3 и 5 – прижимной фланец; 4 – корпус насоса; 6 – крышка корпуса (корпус сальника); 7 – набивка сальника; 8 – защитная втулка; 9 – крышка сальника; 10 – кронштейн; 11 – подшипник; 12 – вал;

б) фото насоса

Так, для защиты от коррозии валы центробежных насосов облицовывают рубашками (защитными втулками, рис. 5.6) из бронзы, стали или чугуна, работающими в паре трения с сальниковой набивкой. Если материал защитных втулок не способен образовывать прочные пленки, то изнашивание будет коррозионно-механическим, а интенсивность его при прочих равных условиях зависит от агрессивности перекачиваемой среды.

В данном случае в качестве материала исполнения втулки применяется коррозионно-стойкая жаропрочная сталь 12Х18Н9Т-6 (ГОСТ 5949-2018), химический состав которой приведен в табл. 5.4.



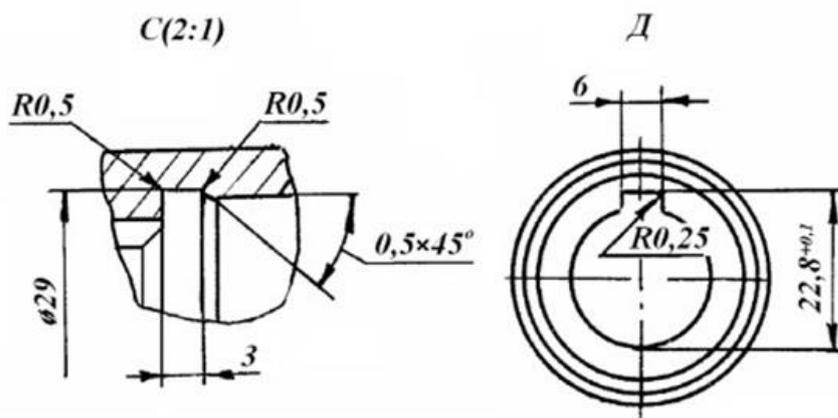


Рисунок 5.6 Фрагмент чертежа защитной втулки

Таблица 5.4 Химический состав стали 12Х18Н9Т-6, ГОСТ 5949-2018

C,%	Si,%	Mn,%	Ni,%	S,%	P,%	Cr,%	Cu,%
0,11	0,8	1,5	8,5	0,02	0,030	16,4	0,28

Выявлено, что износ защитных втулок (рис. 5.7) неравномерен по длине вала. Валаы или защитные втулки, насаженные на валы в местах установки сальниковых уплотнений, должны быть тщательно отшлифованы во избежание нагрева и быстрого износа сальниковых колец.



Рисунок 5.7 Фото изношенной поверхности защитной втулки

Известно, что в процессе эксплуатации поверхность втулки подвергается многоэтапному износу. Изначально форма износа поверхности втулки равномерна, в дальнейшем, под действием моментов сил сопротивления вал может терять прямолинейность, вследствие чего втулка изнашивается только с одной стороны. Односторонний износ втулки может увеличиваться до предельного состояния, при наступлении отказа установки, износ переходит в равномерный.

Согласно руководству по эксплуатации насоса типа X модели «ХО 50-32-125», максимальный допустимый износ защитной втулки составляет 2,3 мм (за 160 суток ра-

боты), при этом, эллипсность и конусность поверхности защитной втулки вала под уплотнением должны быть не более 0,04 и 0,1 мм соответственно.

На рисунке 5.8 показан образец, вырезанный из верхней (рабочей) половины втулки с характерными дефектами. Поверхность защитной втулки характеризуется разной шероховатостью и имеет дефекты в виде продольных клиновидных бороздок, а также трещин. Глубина и ширина дефектов варьируется в пределах от 0,15 до 1,2 мм. Кроме того, на рабочей поверхности присутствует участок шелушения и отслоения поверхностного слоя металла (длиной 5,5 мм и шириной 2,8 мм).

Защитная втулка вала работает на сжатие, кручение, разрыв и истирание, кроме того, втулка подвергается коррозионному износу и резким температурным перепадам. Большое значение имеет также точность изготовления втулки и шероховатость обработки наружной поверхности. Поверхность защитной втулки должна быть термообработанной, гладкой, без рисок, задиров и прочих дефектов. В настоящее время срок службы насоса типа X модели «ХО 50-32-125» на предприятии ООО «Завод «МашСервис»» (г. Кемерово) составляет 5 лет при соблюдении всех условий эксплуатации, при этом, максимальный срок службы защитной втулки не превышает 2 месяцев.

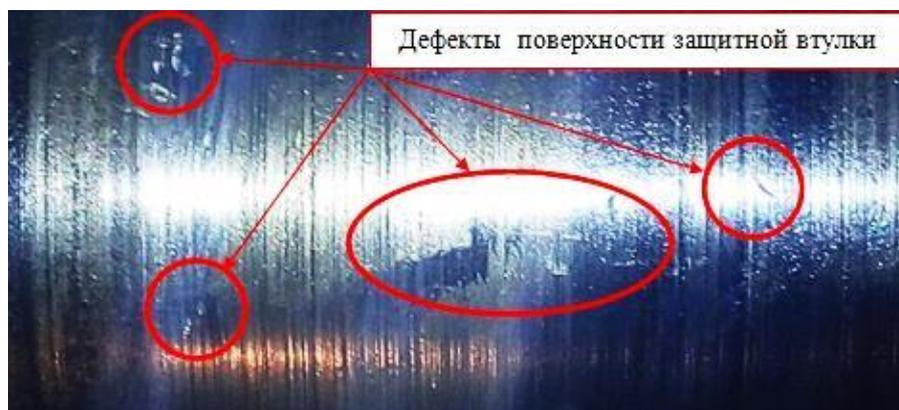


Рисунок 5.8 Фото рабочей поверхности защитной втулки с характерными дефектами

После этого втулка утилизируется, при этом нередко случаи выхода защитных втулок через 5-6 суток. Несмотря на невысокую стоимость детали (в среднем 10 тыс. руб.), годовые расходы составляют 18,7 млн. руб. с учетом того, что каждый из четырех цехов снабжаются шестью насосами. Такие расходы обусловлены транспортировкой, разборкой и сборкой корпуса насоса, проблемами бракованных втулок, хранения и их утилизации. Кроме того, нестабильная экономическая ситуация, а также вводимые санкции приводят к периодическим срывам сроков поставок и простоем техники. В таких условиях целесообразно выполнять ремонтные работы на уже имеющихся деталях и в перспек-

тиве наладить производство силами машиностроительных предприятий Кемеровской области – Кузбасса.

В процессе разработки технологического процесса восстановления поверхности защитной втулки было выполнено исследование химического состава металла и твердости поверхностного слоя. Установлено, что материал защитной втулки соответствует стали 12Х18Н9Т-б (ГОСТ5949-2018), твердость составила 165-170 НV. В рамках проектного технологического процесса изнашиваемая поверхность защитной втулки (рис. 5.9) восстанавливалась путем наплавки проволокой под флюсом, после чего производилась токарная обработка, шлифование и обработка ППД МР-роликом. Режимы обработки ППД МР-роликом назначены исходя из результатов МКЭ-моделирования (таблица 5.5). Такой режим обработки обеспечивал значения степени исчерпания запаса пластичности $\Psi \approx 0,7$ и являлся наиболее благоприятным с точки зрения обеспечения высоких эксплуатационных свойств детали. На рисунке 5.9 представлен внешний вид защитной втулки после восстановления рабочей поверхности по проектному варианту.

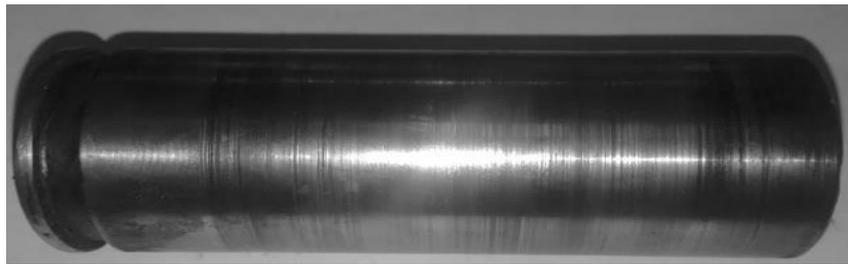


Рисунок 5.9 Фото рабочей поверхности защитной втулки после восстановления по проектному варианту

В таблице 5.5 приведено краткое содержание базового и проектного технологического процесса ремонта защитной втулки.

Таблица 5.5 Базовый и проектный варианты технологического процесса

Базовый	Проектный
005 Фрезерно-центровальная	005 Фрезерно-центровальная
010 Токарная	010 Токарная
015 Токарная	
020 Токарная	
025 Наплавочная	015 Наплавочная
030 Термообработка	020 Термообработка
035 Токарная	025 Токарная
040 Шлифовальная	030 ППД МР-роликом
045 Шлифовальная	
050 Полировальная	

Расчеты режимов обработки ППД МР-роликом проводились исходя из требуемой точности, качества обработанной поверхности и долговечности детали в автоматизированном режиме с использованием программы расчета параметров [129], описанной в разделе 5.1.1 (табл. 5.6).

Таблица 5.6 Режимы ППД МР-роликом

S, мм/об	R _{пр} , мм	P, Н	HV ₀	D _р , мм	n, об/мин	h _д , мм	Ra, мкм	h, мм	δ	N _{цд} , млн. циклов
0,07	1...3	1500	165	60	630	0,05...0,15	0,20	3,5	0,4	4,40

Анализ показал, что проектный вариант технологического процесса (ТП) обеспечивает требуемое качество и точность обработки, а так же снижение трудоёмкости изготовления изделия. Учитывая, что циклическая долговечности изделия, изготовленного с использованием базового ТП, составляет 1-1,5 млн. циклов, повышение долговечности при использовании проектного ТП составило не менее, чем 2,4 раза. В случае, если технические требования предполагают большее значение долговечности, необходимо провести корректировку условий по другим параметрам качества (шероховатость, глубина и степень упрочнения). Таким образом, технологическое время ремонта защитной втулки по проектному варианту без учёта термообработки составило 168,5 мин. (2,67 ч.), термообработка занимает 6 часов. Себестоимость ремонта одной защитной втулки составила 11300,4 руб. По предложенной технологии был выполнен ремонт 5 втулок.

Эксплуатация восстановленных защитных втулок показала, что срок службы увеличился до 15-18 месяцев, что соответствует увеличению ресурса изделия более чем в 15 раз, по сравнению со стандартной технологией восстановления. В ходе технического обслуживания проведённого в 2020 году после 325 дня эксплуатации на отремонтированной рабочей поверхности защитной втулки не выявлено следов разрушения. Акты об использовании результатов диссертационной работы в промышленности приведены в Приложении.

5.4 Экономическая эффективность

Экономическая эффективность проекта оценивалась по методике UNIDO (Организация объединенных наций по промышленному развитию), которая базируется на классических принципах инвестиционного анализа, построенных на основе метода ана-

лиза денежных потоков. Оценка инвестиционного проекта рассчитывалась с использованием динамического метода оценки инвестиционных проектов «Внутренняя норма прибыли (рентабельности) (*IRR, Internal Rate of Return*)». Вся деятельность предприятия в соответствии с принятой методикой подразделяется на операционную, инвестиционную и финансовую. Для оценки эффективности моделировался участок изготовления защитных втулок и валов в условиях предлагаемого к внедрению проектного технологического процесса.

Исходные данные представлены в табл. 5.7.

Кроме того, были заданы:

- налоговое окружение – стандартное;
- инфляция не превышает 12% в год в рублевом исчислении;
- затраты на материалы составляют 12-15% от оптовой цены вала;
- численность персонала участка по изготовлению валов – 12 человек.
- предполагаемые поступления от продажи неиспользуемого по новому варианту технологии оборудования – 2100000 рублей;
- курс рубля на момент начала проекта (2019 год): \$ US=67,10 рублей.

Таблица 5.7 Исходные данные для инвестиционного моделирования

Показатель	Единица измерения	Количество
Программа выпуска	изд/мес	1500
Численность персонала	чел	12
Масса заготовки	кг	62,031
Масса детали	кг	54,59
Стоимость приобретаемого оборудования		
1К62Б (для РСО)	руб	260000
Накатная головка для ППД МР-роликом	руб	52000
Токарный станок с ЧПУ	руб	500000
Кругло-шлифовальный станок 3А164	руб	1000000
Кругло-шлифовальный станок 3А151М32	руб	1000000
Токарный станок 1М63	руб	210000
Общая стоимость оборудования после модернизации	руб	4000000
Затраты на материалы (на 1 изделие)	руб	243
Отходы	руб	1,86
Электроэнергия	руб	9,45
Стоимость электроэнергии	руб/кВт*ч	2,40
Стоимость отходов	руб/тн	250
Стоимость круглого проката	руб/тн	58000

Экономический эффект достигается как за счет экономии материальных ресурсов, сокращения количества операций в технологическом процессе, уменьшения инвестиционных (капитальных) затрат на производство.

Основные расчеты проводились по следующим формулам 5.4-5.8:

— прямые производственные затраты:

$$C_{п.п.} = C_{м} + C_{комп} + C_{з/пл} + C_{э} + C_{др}, \quad (5.4)$$

где перечислены затраты соответственно на материалы, комплектующие, сдельную заработную плату, энергию, расходуемую на технологические нужды и другие;

— постоянные производственные затраты:

$$C_{пост} = C_{сбыт} + C_{адм} + C_{произ}, \quad (5.5)$$

где перечислены затраты на маркетинг и сбыт продукции, административные затраты и постоянные производственные затраты.

— оперативная деятельность:

$$D_0 = П_{сбыт} + П_{др} - C_{пз} - C_{пост} - В_{др}, \quad (5.6)$$

где $П_{сбыт}$ – поступления от сбыта продукции; $П_{др}$ – поступления от других видов деятельности; $В_{др}$ – выплаты на другие виды деятельности.

— инвестиционная деятельность:

$$D_{и} = C_{акт} + C_{подг} + П_{акт}, \quad (5.7)$$

где $C_{акт}$ – затраты на приобретение активов; $C_{подг}$ – другие издержки подготовительного периода; $П_{акт}$ – поступления от продажи активов.

— баланс наличности:

$$H = D_0 + D_{и} + H_{нач}, \quad (5.8)$$

где $H_{нач}$ – баланс наличности на начало периода.

Интегральные показатели проекта рассчитывались по формулам:

— период окупаемости:

$$PVD = \frac{\Pi}{ACI}, \quad (5.9)$$

где Π – сумма инвестиций; ACI – ежегодные поступления;

— чистая приведенная величина дохода:

$$NPV = -Invest + \sum CF(t) \times \left[1 + \frac{Interest}{100}\right]^{-t}, \quad (5.10)$$

где $Invest$ – сумма инвестиций; $Interest$ – годовая процентная ставка; $CF(t)$ – денежные поступления в период времени t ;

– индекс прибыльности:

$$PI = \frac{PVCI}{PVCO}, \quad (5.11)$$

где $PVCI$ – приведенные поступления; $PVCO$ – приведенные выплаты;

– внутренняя норма рентабельности IRR :

$$\sum CF(t) \times [1 + \frac{IRR}{100}]^{-t} - Invest = 0. \quad (5.12)$$

Интегральные показатели при горизонте расчета в 5 лет составляют:

- ставка дисконтирования $I=15\%$;
- период окупаемости $PVD = 6$ месяцев;
- индекс прибыльности $PI = 1,45$;
- внутренняя норма рентабельности $IRR = 65,8\%$;
- чистый приведенный доход $NPV = 1479,33$ \$.

Расчеты проводились с учетом темпов изменения курса рубля, инфляции, ожидаемого налогового окружения и т.д. Доля зарплаты персонала, приходящаяся на проектируемый участок составила: основного рабочего (10 чел) – 30000 руб., вспомогательного рабочего (1 чел) – 25000 руб., начальника участка – 60000 руб. Общие издержки составили 20000 руб. ежемесячно, в течение всего проекта. В качестве итогового результата оценки представлен дисконтированный кэш-фло, иллюстрирующий динамику операционной, инвестиционной и финансовой деятельности участка изготовления втулок и валов (табл. 5.8). Динамика изменения финансовых показателей во времени иллюстрируется ростом чистой прибыли и оборотного капитала, которые свидетельствуют об экономической эффективности проектного технологического процесса (табл. 5.8). В процессе финансового моделирования возможных сценариев проведен анализ чувствительности проекта по чистому приведенному доходу, дисконтированному периоду окупаемости и внутренней норме рентабельности, который показал устойчивость проекта к изменениям внешней среды. На основании представленных результатов экономических расчетов был сделан вывод о том, что предлагаемый инвестиционный (инновационный) проект может быть реализован при существующей экономической ситуации, а вариант, который принят в проекте, является наиболее предпочтительным.

Таблица 5.8 Экономический эффект от реализации проекта: расходная часть, тыс. руб.

Статья доходов/ затрат	2019	2020	2021	2022	2023	ИТОГО
Дополнительный объем производства			38500	42000	45500	126000
Расходы на лицензирование, сертификацию		3000	2000	2000	0	7000
Обслуживание нового оборудования			4000	4000	4000	12000
Замена технологического процесса, внедрение новой технологии		5	1500	2000	2000	5505
Прирост расходов на рекламу и маркетинг (новый продукт)			3000	2000	2000	7000
Командировочные, представительские расходы	500	500	500	500	0	2000
Рост налогов (согласно приросту выпуска, продаж, активов)			700	700	800	2200
ИТОГО РАСХОДЫ ОТ РЕАЛИЗАЦИИ ПРОЕКТА	500	3505	50200	53200	54300	161705
Амортизация	0	31250	32500	32500	32500	128750
СУММАРНЫЙ ЭКОНОМИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ	1500	32755	44650	51650	60550	452160
Налог на прибыль	300	0	8930	10330	12110	31670
ЧИСТАЯ ПРИБЫЛЬ	1200	32755	35720	41320	48440	93925

В ходе технического обслуживания, проведённого в 2020 году после 325 дня эксплуатации, на отремонтированной рабочей поверхности защитной втулки не выявлено следов разрушения. Результаты научных исследований апробированы и приняты к внедрению в виде методик, программных систем расчета и технологических процессов с суммарным годовым экономическим эффектом около 450 тыс. руб. в год. Акты об использовании результатов диссертационной работы в промышленности приведены в Приложении.

5.5 Выводы по главе 5

1. Результаты проведенных исследований позволили разработать алгоритм проектирования, технологию 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. Показана возможность обеспечения благоприятного комплекса физико-механических свойств металла поверхностного слоя обрабатываемой детали.

2. Показано решение прямой и обратной задач технологического проектирования процесса ППД МР-роликом. При решении прямой задачи, по известным режимам обработки (заготовка из стали 45, \varnothing 40 мм, исходная твердость 170 HV, $Ra_{исх}$ 6,3 мкм) при следующих значениях технологических факторов: $D_p = 60$ мм; $n = 1000$ об/мин; $S = 0,07$ мм/об; МР-ролик) рассчитаны: параметры очага деформации, компоненты тензоров напряжений и деформаций в очаге деформации; значения показателей механического состояния вдоль линий тока (степень деформации сдвига $\Lambda=0,64$, степень исчерпания запаса пластичности $\Psi=0,7$.); параметры качества поверхностного слоя (Ra 0,24 мкм; 324 HV; степень упрочнения 30 %); определена величина степени деформации сдвига (СДС) накопленной на стадии ЦД: $\Delta\Lambda_{цд}=1,738$; глубина зарождения усталостной трещины 1,241 мм; длительность стадии ЦД 4,404 млн.циклов. Решение обратной задачи позволило по заданным значениям долговечности ($N_{ц.д.}=5000000$ циклов) определить структуру технологического процесса изготовления вала ($\varnothing 75$ мм, сталь 45 ГОСТ 1050-2013) и режимы обработки ППД МР-роликом. Выбранные значения режима ППД ($P=4500$ Н; $S= 0,05$ мм/об; $n=630$ об/мин.) обеспечили циклическую долговечность, равную $N_{ц.д.} = 5400000$ циклов при степени деформации сдвига, $\Lambda \sim 0,57$ и степень исчерпания запаса пластичности, $\psi \sim 0,52$.

1. Проведена промышленная апробация результатов исследований на примере защитных втулок центробежных насосов, применяемых на производственных объектах ООО «Завод «МашСервис» (г. Кемерово, Кузбасс). В рамках проектного технологического процесса изнашиваемая поверхность защитной втулки (материал 12Х18Н9Т-б ГОСТ 5949-2018) восстанавливалась путем наплавки проволокой под флюсом, после чего производилась токарная обработка, шлифование и обработка ППД МР-роликом (S 0,07 мм/об; P 1500 Н; n 630 об/мин). Выбранный режим обработки обеспечивал значения степени исчерпания запаса пластичности $\Psi = 0,7$ и являлся наиболее благоприятным с точки зрения обеспечения высоких эксплуатационных свойств детали. Технологическое время ремонта защитной втулки по проектному варианту без учёта термообработки составило 168,5 мин. (2,67 ч.), термообработка занимает 6 часов. Себестоимость ремонта одной защитной втулки составила 11300,4 руб. По предложенной технологии был выполнен ремонт 5 втулок. Эксплуатация восстановленных защитных втулок показала, что срок службы увеличился до 15-18 месяцев, что соответствует увеличению ресурса изделия более чем в 15 раз, по сравнению со стандартной технологией восстанов-

ления. В ходе технического обслуживания проведённого в 2020 году после 325 дня эксплуатации на отремонтированной рабочей поверхности защитной втулки не выявлено следов разрушения.

2. Выполнено технико-экономическое обоснование применения ППД МР-роликом на примере защитной втулки центробежного насоса. В ходе технического обслуживания, проведённого в 2020 году после 325 дня эксплуатации, на отремонтированной рабочей поверхности защитной втулки не выявлено следов разрушения. Результаты научных исследований апробированы и приняты к внедрению в виде методик, программных систем расчета и технологических процессов с суммарным годовым экономическим эффектом около 450 тыс. руб. в год.

5. В результате проведённых производственных испытаний установлено, что применение ППД МР-роликом обеспечило низкую шероховатость (до Ra 0,231-0,289 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.

6. Результаты исследований нашли применение на ООО «ОКС». Спроектировано, изготовлено и внедрено специальное приспособление, используемое на токарных станках с ЧПУ. Внедрена новая для предприятия технология поверхностного пластического деформирования мультирадиусным роликом, что позволило исключить из структуры технологического процесса операцию термической обработки. 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; твердость по Виккерсу 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. Суммарный годовой эффект, обусловленный экономией материальных и экономических ресурсов, составил 380 тыс. руб. в год.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации изложены новые научно обоснованные технические и технологические решения, касающиеся новой технологии финишной отделочно-упрочняющей обработки поверхностным пластическим деформированием мультирадиусным роликом, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие страны

Основные результаты диссертационной работы состоят в следующем.

1. Результаты проведенных научных исследований и предложенные для практического применения технологические рекомендации упрочняюще-чистой 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 позволяет применять натяги деформирующих элементов до уровня $0,15$ мм, 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 с учетом явления технологического наследования свойств обрабатываемой детали 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.

**ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ, УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ, СИМВОЛОВ,
ЕДИНИЦ И ТЕРМИНОВ**

Обозначение	Наименование	Единица измерения
Термины		
ППД	Поверхностное пластическое деформирование	-
ТН	Технологическое наследование	-
МТН	Механика технологического наследования	-
МКЭ	Метод конечных элементов	-
ОД	Очаг деформации	-
ПС	Поверхностный слой	-
ОН	Остаточные напряжения	-
СДС	Степень деформации сдвига	-
СИЗП	Степень использования запаса пластичности	-
БДТН	База данных технологической наследственности	-
ЛТ	Линия тока	-
МР-ролик	Мультирадиусный ролик	-
Гидростатическое давление	Среднее нормальное напряжение со знаком минус	МПа
Зоны перекрытия очагов деформации	это зоны в поверхностном слое детали, образованные пересекающимися между собой двумя очагами деформации от инденторов МР-ролика, в которых преобладает высокое гидростатическое давление (среднее нормальное напряжение со знаком минус)	
Параметры режима размерного совмещенного обкатывания		
R_{np}	Профильный радиус деформирующего ролика	мм
h_z	Заданный натяг	мм
a_z	Заданный зазор	мм
h_δ	Действительный натяг	мм
a_δ	Действительный зазор	мм
$h_p = h_\delta + a_\delta$	Расчетный натяг	мм
S	Подача	мм/об
n	Частота вращения обрабатываемой детали	об/мин
D_δ	Диаметр обрабатываемой детали	мм
D_p	Диаметр деформирующего инструмента (ролика)	мм
V	Скорость обработки	м/мин
P	Усилие обработки	Н (кгс)
Геометрические параметры очагов деформации при РСО		
d	Длина горизонтальной проекции передней дуги контакта ролика с заготовкой	мм
d_1	Горизонтальная проекция задней дуги контакта ролика с заготовкой	мм
h_ϵ	Высота пластической волны	мм
l	Длина передней внеконтактной зоны ОД (включая зону контакта с резцом)	мм
$L = l + d$	Длина передней зоны ОД (включая зону контакта с резцом и горизонтальную проекцию передней дуги)	мм

Обозначение	Наименование	Единица измерения
	контакта ролика с заготовкой)	
Δ	Высота упруго-пластического восстановления металла за деформирующим инструментом	мм
Параметры упрочнения поверхностного слоя		
h	Глубина упрочнения	мм
δ	Степень упрочнения	– (%)
HV_0	Исходная твердость металла поверхностного слоя по Виккерсу	МПа (кгс/мм ²)
HV_n	Достигнутая в результате упрочнения твердость металла поверхностного слоя по Виккерсу	МПа (кгс/мм ²)
Параметры шероховатости поверхности		
Ra	Среднее арифметическое отклонение профиля	мкм
Rz	Высота неровностей профиля по десяти точкам	мкм
$Rmax$	Наибольшая высота неровностей профиля	мкм
S_m	Средний шаг неровностей профиля	мкм
Rp	Высота наибольшего выступа профиля	мкм
Rv	Глубина наибольшей впадины профиля	мкм
Параметры механики пластического деформирования		
$\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_{xy}$	Компоненты относительных деформаций	–
U_x, U_y, U_z	Компоненты вектора перемещения материального элемента в направлении трех координатных осей	мм
v_x, v_y, v_z	Компоненты вектора скорости	м/с (мм/с)
$[T\sigma_{ocm}]$	Тензор остаточных напряжений	–
$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \sigma_{xy}$	Компоненты тензора напряжений	МПа (кгс/мм ²)
σ	Среднее нормальное напряжение	МПа (кгс/мм ²)
σ, T	Интенсивность напряжений и интенсивность касательных напряжений	МПа (кгс/мм ²)
Π	Показатель схемы напряженного состояния	–
ξ_x, ξ_y, ξ_{xy}	Компоненты скоростей деформации и скоростей деформации сдвига	с ⁻¹
ε, Γ	Интенсивность деформации, интенсивность деформации сдвига	–
ξ	Интенсивность скоростей деформации	с ⁻¹
H	Интенсивность скоростей деформаций сдвига	с ⁻¹
Λ	Степень деформации сдвига	–
Ψ	Степень исчерпания запаса пластичности	–
μ	Показатель вида напряженного состояния (показатель Лоде)	–
Свойства материала		
E	Модуль упругости первого рода (модуль Юнга)	МПа (кгс/мм ²)
ρ	Плотность материала	кг/м ³
σ_{02}, σ_T	Условный и физический предел текучести	МПа (кгс/мм ²)
σ_σ	Предел прочности при растяжении	МПа (кгс/мм ²)

Обозначение	Наименование	Единица измерения
σ_{\perp}	Предел выносливости при циклическом нагружении	МПа (кгс/мм ²)
α	Коэффициент линейного теплового расширения	град ⁻¹
η	Коэффициент трения в контакте между поверхностью детали и индентора	–
ν	Коэффициент поперечной деформации (коэффициент Пуассона)	–
$\sigma_{\text{эт}}, T_{\text{мод}}$	Экстраполированный предел текучести, тангенциальный модуль (параметры билинейной аппроксимации кривой течения)	МПа (кгс/мм ²)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Суслов А.Г. Качество поверхностного слоя деталей машин. М.: Машиностроение, 2000.
2. Безъязычный В.Ф. Влияние качества поверхностного слоя после механической обработки на эксплуатационные свойства деталей машин. / В.Ф. Безъязычный // Инженерный журнал. Справочник, № 4, 2000. - С. 9 -16.
3. Технологические основы управления качеством машин/А.С.Васильев, А.М. Дальский, М.Л.Хейфец и др. – Минск: ФТИ НАНБ, 2002. – 216 с.
4. Технологические основы управления качеством машин / А.В. Васильев [и др.]. - М.: Машиностроение, 2003. - 256 с.
5. Технологическое обеспечение и повышение эксплуатационных свойств деталей и их соединений / А.Г. Суслов [и др.]. - М.: Машиностроение, 2006. - 448 с.
6. Сутягин А.Н. Влияние параметров качества поверхностного слоя деталей узлов трения на величину их износостойкости // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2007. № 6. С. 46-48.
7. Финишная обработка поверхностей при производстве деталей / С.А. Клименко [и др.]; под общ.ред. С.А. Чижика и М.Л.Хейфеца. — Минск: Беларус. навука, 2017. — 377 с.
8. Обеспечение качества изделий в технологических комплексах / С.А. Чижик [и др.]; под ред. М.Л. Хейфеца. - Минск: Беларус. навука, 2019. - 248 с.
- 9 Zhang S. et al. Analysis of thread rolling process using an analytical single tooth rolling model based on the slip line field theory and slab method //Journal of Manufacturing Processes. – 2022. – Vol. 76. – P. 675-686.
- 10 Kukielka K. Numerical simulations of the thread rolling process as ecological and economical research tool in the implementation of modern technologies //RocznikOchronyŚrodowiska (Annual Set The Environment Protection). – 2017. – Vol. 19.
- 11 Cheng M. et al. Development of ultrasonic thread root rolling technology for prolonging the fatigue performance of high strength thread //Journal of Materials Processing Technology. – 2014. – Vol. 214. – Iss. 11. – P. 2395-2401.
- 12 Афонин А. Н. и др. Гетерогенное упрочнение резьб и профилей поверхностным пластическим деформированием / А. Н. Афонин, А. В. Макаров, А. И. Ларин, Е. М. Мартынов // Научно-технический вестник Поволжья. – 2018. – № 6. – С. 41.
- 13 Sağlam H., Kuş R. Performance of internal thread rolling head and the mechanical properties of rolled thread //6th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11). – 2011. – P. 16-18.
- 14 Huang B. et al. Surface layer modification by cryogenic burnishing of Al 7050-T7451 alloy with near ultra-fine grained structure //Journal of Manufacturing Science and Engineering. – 2022. – Vol. 144. – Iss. 3.

- 15 Carlton J. Marine propellers and propulsion. – Butterworth-Heinemann. – 2018. – P.609.
- 16 Slavov S. D., Iliev I. V. Research on the variability of the burnishing force during processing surfaces with 3D shape by using simultaneous 5-axis ball-burnishing process implemented on CNC milling machine. – 2017.
- 17 Altenberger I. et al. On the effect of deep-rolling and laser-peening on the stress-controlled low-and high-cycle fatigue behavior of Ti–6Al–4V at elevated temperatures up to 550 C //International Journal of Fatigue. – 2012. – Vol. 44. – P. 292-302.
- 18 Bäcker V. et al. Analysis of the deep rolling process on turbine blades using the FEM/BEM-coupling //IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing. – 2010. – Vol. 10. – Iss. 1. – P. 012134.
- 19 Ножницкий Ю. А. и др. Разработка и применение новых методов упрочнения деталей ГТД, основанных на пластическом деформировании поверхностных слоев. (Обзор) / Ю. А. Ножницкий, А. В. Фишгойт, Р. И. Ткаченко, С. В. Теплова // Вісникдвигунобудування. – 2006. – №2. – С. 8-16.
- 20 Kropotkina E. et al. Application of roller burnishing technologies to improve the wear resistance of submerged pump parts made of powder alloys //Mechanics & Industry. – 2018. – Т. 19. – №. 7. – С. 705.
- 21 Duncheva G. V. et al. Improvement in surface integrity of CuAl8Fe3 bronze via diamond burnishing //The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2022. – P. 1-18.
- 22 Babu N. V. et al. Investigation of mechanical characteristics of SiC and flyash particle reinforced aluminium matrix composites //Materials Today: Proceedings. – 2022.
- 23 Zhen-yu Z. et al. Effect of surface burnishing process with different strain paths on the copper microstructure //Journal of Manufacturing Processes. – 2021. – Vol.71. – P. 653-668.
- 24 Nestler A., Schubert A. Roller burnishing of particle reinforced aluminium matrix composites //Metals. – 2018. – Vol 8. – Iss. 2. – P. 95.
- 25 Varpe N.J., Gurnani U., Hamilton A. Optimization of burnishing process by Taguchi method for surface enhancement of EN31 steel / N.J. Varpe, U. Gurnani, A. Hamilton// Surface Topography: Metrology and Properties. – 2022. –Vol. 10 (1). – P.015017.
- 26 Uddin M. et al. A Grinding-Burnishing Approach to Enhancing Surface Integrity, Tribological, and Corrosion Behavior of Laser-Cladded AISI 431 Alloys //Journal of Manufacturing Science and Engineering. – 2022. – Vol. 144. – Iss. 7.
- 27 Shankar E., Sampath Kumar T., Stalin John M.R., Devanathan C. Optimization of Roller Burnishing Parameters of Al(SiC)p Metal Matrix Composite with TiAlN-Coated Roller Using Response Surface Methodology. In: Rajmohan, T., Palanikumar, K., Davim, J.P. (eds) Advances in Materials

and Manufacturing Engineering. Springer Proceedings in Materials. – 2021. – Vol 7. – https://doi.org/10.1007/978-981-15-6267-9_25.

28 Ao N. et al. Enhanced fatigue performance of modified plasma electrolytic oxidation coated Ti-6Al-4V alloy: Effect of residual stress and gradient nanostructure //Applied Surface Science. – 2019. – Vol. 489. – P. 595-607.

29 Jagadeesh G. V., GangiSetti S. Surface integrity of ball burnished bioresorbable magnesium alloy //Advances in Manufacturing. – 2022. – P. 1-21.

30 Thesleff A., Ortiz-Catalán M., Brånemark R. Low plasticity burnishing improves fretting fatigue resistance in bone-anchored implants for amputation prostheses / A. Thesleff, M. Ortiz-Catalán, R. Brånemark// Medical Engineering & Physics. – 2022. – Vol. 100. – P.103755.

31 Agarwal S., Curtin J., Duffy B. et al. Biodegradable magnesium alloys for orthopaedic applications: a review on corrosion, biocompatibility and surface modifications. Mater. Sci. Eng. C. –2016. – Vol. 68. – P. 948–963.

32 Pu Z., Song G.L., Yang S. et al. Grain refined and basal textured surface produced by burnishing for improved corrosion performance of AZ31B Mg alloy. Corros. Sci. – 2012. – Vol. 57. – P.192-201.

33 Salahshoor M., Guo Y. B. Surface integrity of biodegradable Magnesium–Calcium orthopedic implant by burnishing //Journal of the mechanical behavior of biomedical materials. – 2011. – Vol. 4. – Iss. 8. – P. 1888-1904.

34 Denkena B., Lucas A. Biocompatible magnesium alloys as absorbable implant materials–adjusted surface and subsurface properties by machining processes //CIRP annals. – 2007. – Vol. 56. – Iss 1. – P. 113-116.

35 SanguedolceM. etal. Burnishing of AM materials to obtain high performance part surfaces //Journal of Industrial Engineering and Management. – 2022. – T. 15. – №. 1. – C. 73-89.

36 LowK. O., WongK. J. Influence of ball burnishing on surface quality and tribological characteristics of polymers under dry sliding conditions //Tribology International. – 2011. – T. 44. – №. 2. – C. 144-153.

37 Cagan S. C., Buldum B. B., Ozkul I. Experimental investigation on the ball burnishing of carbon fiber reinforced polymer //Materials and Manufacturing Processes. – 2019. – T. 34. – №. 9. – C. 1062-1067.

38 El-Tayeb N. S. M., Low K. O., Brevern P. V. The influence of roller burnishing process on hardness and roughness of cylindrical polymer surfaces //Proceedings of the institution of mechanical engineers, part j: journal of engineering tribology. – 2008. – T. 222. – №. 7. – C. 947-955.

39 Janczewski Ł. etal. Effects of ball burnishing on surface properties of low density polyethylene //Tribology International. – 2016. – T. 93. – C. 36-42.

- 40 Al-Saeedi S., Sarhan A. A. D., Bushroa A. R. Investigating the tribological characteristics of burnished polyoxymethylene—ANFIS and FE modeling //Tribology Transactions. – 2018. – Т. 61. – №. 5. – С. 880-888.
- 41 I-Saeedi S., Sarhan A. A. D., Bushroa A. R. Investigating the Surface Tribology of Roller-Burnished Polymer Using the Fuzzy Rule-Based Approach //Tribology Transactions. – 2015. – Т. 58. – №. 2. – С. 240-246.
- 42 Low K. O. Surface characteristics modification of polyoxymethylene and polyurethane using burnishing //Tribology transactions. – 2010. – Т. 54. – №. 1. – С. 96-103.
43. Rotella G., Rinaldi S., Filice L. Roller burnishing of Ti6Al4V under different cooling/lubrication conditions and tool design: effects on surface integrity //The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2020. – Vol. 106. – Iss. 1. – P. 431-440.
44. Hiegemann L. et al. Analytical prediction of roughness after ball burnishing of thermally coated surfaces //Procedia Engineering. – 2014. – Vol. 81. – P. 1921-1926.
45. Лебедев, В. А. Кинетическая модель упрочнения поверхностного слоя деталей виброударными методами ППД / В. А. Лебедев, И. В. Чумак // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2008. – № 7(43). – С. 3-8. – EDNJWEXDN.
46. Charfeddine Y. et al. Study of the simultaneous Grinding/Ball-burnishing of AISI 4140 based on finite element simulations and experiments //International Journal of Mechanical Sciences. – 2021. – Vol. 192. – P. 106097.
47. Ao N. et al. Gradient nanostructure evolution and phase transformation of α phase in Ti-6Al-4V alloy induced by ultrasonic surface rolling process //Materials Science and Engineering: A. – 2019. – Vol. 742. – P. 820-834.
48. Fu C. H. et al. Austenite–martensite phase transformation of biomedical Nitinol by ball burnishing //Journal of Materials Processing Technology. – 2014. – Vol. 214. – Iss. 12. – P. 3122-3130.
49. Yang J. et al. The effect of ultrasonic surface rolling process on the fretting fatigue property of GH4169 superalloy //International Journal of Fatigue. – 2020. – Vol. 133. – P. 105373.
50. Maximov J. T. et al. Impact of slide diamond burnishing additional parameters on fatigue behaviour of 2024-T3 Al alloy //Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures. – 2019. – Vol. 42. – Iss. 1. – P. 363-373.
51. Bertini L., Santus C. Fretting fatigue tests on shrink-fit specimens and investigations into the strength enhancement induced by deep rolling //International Journal of Fatigue. – 2015. – Vol. 81. – P. 179-190.
52. Xu X. et al. Effects of Ultrasonic Surface Rolling on the Localized Corrosion Behavior of 7B50-T7751 Aluminum Alloy //Materials. – 2020. – Vol. 13. – Iss. 3. – P. 738.

53. Zhang P., Liu Z. Enhancing surface integrity and corrosion resistance of laser clad Cr–Ni alloys by hard turning and low plasticity burnishing // *Applied Surface Science*. – 2017. – Vol. 409. – P. 169-178.
54. Tang J., Luo H. Y., Zhang Y. B. Enhancing the surface integrity and corrosion resistance of Ti-6Al-4V titanium alloy through cryogenic burnishing // *The international journal of advanced manufacturing technology*. – 2017. – Vol. 88. – Iss. 9. – P. 2785-2793.
55. Guo Q. et al. Synthesis, corrosion, and wear resistance of a black microarc oxidation coating on pure titanium // *Surface and Coatings Technology*. – 2020. – Vol. 386. – P. 125454.
56. Wang C. et al. Enhanced wear resistance of 316 l stainless steel with a nanostructured surface layer prepared by ultrasonic surface rolling // *Coatings*. – 2019. – Vol. 9. – Iss. 4. – P. 276.
57. Muñoz-Cubillos J., Coronado J. J., Rodríguez S. A. On the cavitation resistance of deep rolled surfaces of austenitic stainless steels // *Wear*. – 2019. – Vol. 428. – P. 24-31.
58. Tsao C. C., Chiu Y. C. Evaluation of drilling parameters on thrust force in drilling carbon fiber reinforced plastic (CFRP) composite laminates using compound core-special drills // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. – 2011. – Vol. 51. – Iss. 9. – P. 740-744.
59. Блюменштейн В. Ю., Махалов М. С. Механика поверхностного слоя при обработке размерным совмещенным обкатыванием // *Упрочняющие технологии и покрытия*. – 2006. – №. 2. – С. 18-26.
60. Блюменштейн В. Ю. Комбинированные и совмещенные технологии упрочнения штоков гидроцилиндров и валов редукторов горных машин // *Инновации в технологиях и образовании*. – 2016. – С. 241-244.
61. Самуль А. Г. Кинематические характеристики процесса ультразвуковой поверхностной обработки // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. – 2022. – Т. 26. – №. 1 (162). – С. 24-34.
62. Дуров Д. С., Диденко Д. И., Рыбинская Т. А. Поверхностно-упрочняющая обработка с предварительным нагревом поверхностного слоя детали // *Тяжелое машиностроение*. – 2010. – №. 8. – С. 38-39.
63. Отений, Я. Н. Особенности и перспектива использования в раскатниках цилиндрических деформирующих роликов / Я. Н. Отений, А. Э. Вирт, А. М. Лаврентьев // *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. – 2016. – № 12-3. – С. 445-447.
64. Патент № 2474486 С1 Российская Федерация, МПК В23D 37/00. Способ пластического деформирования и калибрования внутренних цилиндрических поверхностей деталей деформирующе-режущим инструментом : № 2011125443/02 : заявл. 20.06.2011 : опубл. 10.02.2013 / Ю. С. Степанов, А. В. Киричек, В. В. Морин [и др.]

65. Патент № 2759278 С1 Российская Федерация, МПК В23К 9/04, С21D 7/06, С21D 9/50. Способ наплавки с упрочнением волной деформации : № 2020129875 : заявл. 10.09.2020 : опубл. 11.11.2021 / А. В. Киричек, Д. Л. Соловьев, А. А. Жирков, С. О. Федонина
66. Патент № 2755081 С1 Российская Федерация, МПК В24В 39/00, В23К 28/02, С21D 9/50. Устройство для наплавки с упрочнением волной деформации : № 2020129069 : заявл. 02.09.2020 : опубл. 13.09.2021 / А. В. Киричек, Д. Л. Соловьев
67. Патент №2557377, Российская Федерация. Ролик обкатной мультирадиусный: № 2013135797/02; заявл. 20.07.20153; опубл. 27.05.2016, Бюл. № 27 (II ч.). 6 с.
68. Патент № 2764452 С1 Российская Федерация, МПК В24В 39/04. Устройство для круговой осцилляции рабочего инструмента : № 2021106567 : заявл. 15.03.2021 : опубл. 17.01.2022 / С. А. Зайдес, Х. Х. Нгуен, В. Н. Москвитин.
69. Патент № 2673896 С1 Российская Федерация, МПК В24В 39/04. Ролик обкатной : № 2017108874 : заявл. 16.03.2017 : опубл. 03.12.2018 / С. А. Зайдес, А. В. Колесник.
70. Патент № 2763061 С1 Российская Федерация, МПК В24В 39/04, F16H 19/08, F16H 37/04. Устройство для образования маятникового движения рабочего инструмента : № 2021116866 : заявл. 10.06.2021 : опубл. 27.12.2021 / С. А. Зайдес, М. К. Хо.
71. Патент № 2600302 С1 Российская Федерация, МПК В21Н 1/18. Устройство для обкатывания цилиндрических изделий плоскими инструментами : № 2015114157/02 : заявл. 16.04.2015 : опубл. 20.10.2016 / С. А. Зайдес, Д. Ф. Фам
72. De Lacalle L. N. L. et al. Quality improvement of ball-end milled sculptured surfaces by ball burnishing //International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2005. – Т. 45. – №. 15. – С. 1659-1668.
73. Patent US 10603764. Meyer. Burnishing tool and method of manufacturing the same.2020.
74. Patent US 0171447 Hawkes. Deep rolling tool and method. 2018.
75. Patent US 0367479 Miyauchi. Roller burnishing tool device. 2015.
76. Patent US 8601659 Prevey. Burnishing tool and method for burnishing.2013.
77. PatentUS 8296912 Shiou. Burnishingtool. 2012.
78. Блюменштейн В. Ю., Кречетов А. А. Исследование накопления деформаций и исчерпания запаса пластичности при ППД с использованием ультразвукового контроля //Упрочняющие технологии и покрытия. – 2007. – №. 10. – С. 40-43.
79. Митрофанова К. С., Блюменштейн В. Ю. Анализ влияния запаса пластичности на накопление деформаций при ППД сложнопрофильным инструментом //УПРОЧНЯЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ И ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ПОКРЫТИЯ В МАШИНОСТРОЕНИИ. – 2017. – С. 111-111.
80. Блюменштейн В.Ю., Митрофанова К.С. Анализ влияния запаса пластичности на накопление деформаций при ппд сложнопрофильным инструментом. УПРОЧНЯЮЩИЕ ТЕХНОЛО-

ГИИ И ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ПОКРЫТИЯ В МАШИНОСТРОЕНИИ сборник трудов III Всероссийской молодежной научно-практической конференции. - 2017. - С.111-1-111-4.

81. Радченко С. Ю. и др. Математическая модель упрочняющей обработки внутренней поверхности деталей типа втулок интенсивной пластической деформацией в условиях комплексного локального нагружения очага деформации //Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2013. – №. 5. – С. 40-47.
82. Смелянский В. М. Механика упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием / В. М. Смелянский. - М.: Машиностроение, 2002. - 300 с.
83. Блюменштейн В.Ю., Смелянский В.М. Механика технологического наследования на стадиях обработки и эксплуатации деталей машин. – М.: Машиностроение,– 2007. – 400 С. – ISBN 5-942-75342-9.
84. Технология и инструменты отделочно-упрочняющей обработки деталей поверхностным пластическим деформированием. В 2 т. Т. 1 / А.Г. Суслов, В.Ю. Блюменштейн, Р.В. Гуров, А.Н. Исаев, Л.Г. Одинцов, В.В. Плешаков, В.В. Федоров, Ю.Г. Шнейдер; под общ.ред. А.Г. Суслова. – М.: Машиностроение. – 2014. – 480 с. – ISBN 978-5-94275710-6.
85. Федонин О. Н., Степошина С. В. Научное обоснование выбора режимов обработки при поверхностном пластическом деформировании //Вестник Брянского государственного технического университета. – 2011. – №. 1. – С. 4-8.
86. Зайдес С.А., Блюменштейн В.Ю., Киричек А.В. и др. Технологические процессы поверхностного пластического деформирования / С.А. Зайдес, В.Ю. Блюменштейн, А.В. Киричек и др. // ИрГТУ. – 2007. – С. 404.
87. Отений Я.Н., Ольштынский Н.В., Ольштынский С.Н., Щеголев Н.Г. Особенности определения рациональных параметров деформирующих элементов и технологических режимов обработки при поверхностном пластическом деформировании / Я.Н.Отений, Н.В.Ольштынский, С.Н.Ольштынский, Н.Г.Щеголев // Упрочняющие технологии и покрытия. –2010.– № 12 (72). – С. 3-6.
88. Вирт А.Э. Влияние силы деформирования при поверхностном пластическом деформировании на глубину упрочнения поверхностного слоя детали / А.Э. Вирт // Научные технологии в машиностроении.– 2021. –№ 1 (115). –С. 44-48.
89. Ширяев А.А., Трофимов В.Н., Карманов В.В.Методы пластического поверхностного деформирования как технология управления качеством поверхностного слоя деталей авиа- и машиностроения (обзор) /Ширяев А.А., Трофимов В.Н., Карманов В.В. // Аэрокосмическая техника, высокие технологии и инновации. –2017. –Т. 1. –С. 296-299.

90. Мартыненко О. В. Исследование влияния геометрических параметров деформирующих роликов на качество поверхностного слоя при обработке поверхностным пластическим деформированием: дис. ... канд-та. техн. наук : 05.03.01. - Волгоград., 2003. - 178 с.
91. Altenberger I. Deep rolling—the past, the present and the future / I Altenberger // Conf Proc: ICSP-9. – 2005. – P.144-155. – ISBN 2-907669-37-0.
92. Hassan A. M. The effects of ball-and roller-burnishing on the surface roughness and hardness of some non-ferrous metals //Journal of materials processing technology. – 1997. – Т. 72. – №. 3. – С. 385-391.
93. Maximov J. T. et al. A new single-roller burnishing technique decreasing roughness obtained //J Mater Sci Eng Adv Technol. – 2010. – Т. 2. – №. 2. – С. 177-202.
94. Дальский А.М. Технологическая наследственность в машиностроительном производстве / Под.ред. А. М. Дальского. - М.: Изд-во МАИ, 2000. - 364 с.
95. Васильев А. С., Дальский А. М., Золотаревский Ю. М. и др. Направленное формирование свойств изделий машиностроения / Под ред. А. И. Кондакова. - М.: Машиностроение, 2005. - 352 с.
96. Васильев А.С. Технологическая наследственность в машиностроении / А. С. Васильев // ВЕСТНИК РЫБИНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННОЙ АВИАЦИОННОЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ АКАДЕМИИ ИМ. П. А. СОЛОВЬЕВА. – 2017. - 1 (40). – С. 198-202.
97. Дальский А.М., Косилова А.Г. и др. (ред.) - Справочник технолога-машиностроителя. Том 1. М: Машиностроение-1 2003. 911с.
98. Дудников А.А., Дудник В.В., Келемеш А.А., Горбенко А.В., Лапенко Т.Г. Повышение надежности деталей машин поверхностным пластическим деформированием//Вібрації в техніці та технологіях. 2017. 3(86). С.74-78.
99. Кыонг Н.К., Зайдес С.А., Куанг Л.Х. Оценка качества упрочненного слоя при поверхностном пластическом деформировании роликами разных конструкций. Вестник ИрГТУ Том 22, № 1, - 2018, С. 30-37.
100. Киричек А.В., Мальцев А.Ю. и др. Повышение эффективности обкатывания оболочек роликами технологическими методами / А.В. Киричек, А.Ю. Мальцев, М.Ф. Селеменев, А.Ф. Осипова // Вестник рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П. А. Соловьева. –2010. –№2 (17). –С. 60-63.
101. Вулых Н. В., Горбунов А. В. Центробежное обкатывание нежестких валов для достижения минимальной шероховатости и максимальной несущей способности поверхности //Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2012. – №. 10 (69). – С. 34-39.
102. Шнейдер Ю.Г. Эксплуатационные свойства деталей с регулярным микрорельефом / Серия «Выдающиеся ученые ИТМО» - СПб: СПб ГИТМО (ТУ), 2001. - 264 с. - 100 экз.

103. Ветрова Е.А., Лебедев П.А., Адеев А.С. Зависимость шероховатости поверхности от материала обрабатываемой детали и конструкционных параметров устройства для комбинированной обработки резанием и поверхностным пластическим деформированием при обработке нежестких деталей типа полый цилиндр / Е.А. Ветрова, П.А. Лебедев, А.С. Адеев // Известия МГТУ «МАМИ». – 2013. – № 1(15) . – Т. 2. – С. 262-267.
104. Кугультинов С.Д., Ковальчук А.К., Портнов И.Н. Технология обработки конструкционных материалов. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. – 672 с.
105. Гуров Р.В., Щербаков А.Н. Отделочно-упрочняющая обработка поверхностно-пластическим деформированием / Р.В. Гуров, А.Н. Щербаков // Научные технологии в машиностроении. – 2021. – №4(118). – С.3-9.
106. Зайдес С.А., Хинь Н.В. Оценка качества поверхностного слоя при реверсивном поверхностном пластическом деформировании. Вестник ИРГТУ № 6 (113) 2016/ PROCEEDING-SofISTU. - № 6 (113), - 2016, С.34-40.
107. Abrao A. M., Denkena B., Breidenstein B., Morke T. Surface and subsurface alterations induced by deep rolling of hardened AISI 1060 steel. *Prod. Eng. Res. Devel.* Volume 8, Issue 5, pp 551–558
108. Rodríguez A., López de Lacalle L.N., Celaya A., Lamikiz A., Albizuri J. Surface improvement of shafts by the deep ball-burnishing technique *Surface and Coatings Technology* Volume 206, Issues 11–12, 15 February 2012, Pages 2817-2824.
109. Lin Y. C., Wang S. W., Lai H. Y. The relationship between surface roughness and burnishing factor in the burnishing process // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology.* – 2004. – Т. 23. – №. 9. – С. 666-671
110. Hamadache H. et al. Characteristics of Rb40 steel superficial layer under ball and roller burnishing // *Journal of Materials Processing Technology.* – 2006. – Т. 180. – №. 1-3. – С. 130-136.
111. Maximov J. et al. Enhancement of fatigue life of rail-end-bolt holes by slide diamond burnishing // *Engineering Solid Mechanics.* – 2014. – Т. 2. – №. 4. – С. 247-264.
112. Radziejewska J., Skrzypek S. J. Microstructure and residual stresses in surface layer of simultaneously laser alloyed and burnished steel // *Journal of materials processing technology.* – 2009. – Т. 209. – №. 4. – С. 2047-2056.
113. Swirad S. The effect of burnishing parameters on steel fatigue strength // *Nonconventional Technol Rev.* – 2007. – Т. 1. – С. 113-118.
114. Kuznetsov V. P., Tarasov S. Y., Dmitriev A. I. Nanostructuring burnishing and subsurface shear instability // *Journal of Materials Processing Technology.* – 2015. – Т. 217. – С. 327-335.
115. Hamadache H. et al. Improvement of surface conditions of 36 Cr Ni Mo 6 steel by ball burnishing process // *Journal of Mechanical Science and Technology.* – 2014. – Т. 28. – №. 4. – С. 1491-1498.

116. Hankare A. V., Sapkal A. A., Dounde A. A. Effect of diamond burnishing process on surface roughness of AISI 4140 alloy steel //J Adv Sci Technol. – 2017. – Т. 13. – №. 1. – С. 405-410.
117. Líska J., Líska K., Kodácsy J. Hard cutting and diamond burnishing of 100Cr6 steel bearings //Key Engineering Materials. – Trans Tech Publications Ltd, 2014. – Т. 581. – С. 169-175.
118. Maximov J. T. et al. Modelling the power parameters of the spherical motion burnishing //Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science. – 2012. – Т. 226. – №. 2. – С. 521-532.
119. Chen C. H., Shiou F. J. Determination of optimal ball-burnishing parameters for plastic injection moulding steel //The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2003. – Т. 21. – №. 3. – С. 177-185.
120. TOBOŁA D. et al. Structure and properties of burnished and nitrided AISI D2 tool steel //Materials Science. – 2015. – Т. 21. – №. 4. – С. 511-516.
121. Toboła D., Kania B. Phase composition and stress state in the surface layers of burnished and gas nitrided Sverker 21 and Vanadis 6 tool steels //Surface and Coatings Technology. – 2018. – Т. 353. – С. 105-115.
122. Tanaka H., Ishii W., Yanagi K. Optimal burnishing conditions and mechanical properties of surface layer by surface modification effect induced of applying burnishing process to stainless steel and aluminum alloy //Journal of the Japan Society for Technology of Plasticity. – 2011. – Т. 52. – №. 605. – С. 726-730.
123. Sachin B., Narendranath S., Chakradhar D. Sustainable diamond burnishing of 17-4 PH stainless steel for enhanced surface integrity and product performance by using a novel modified tool //Materials Research Express. – 2019. – Т. 6. – №. 4. – С. 046501.
124. Luo H. et al. Investigation of the burnishing process with PCD tool on non-ferrous metals //The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2005. – Т. 25. – №. 5. – С. 454-459.
125. Одинцов Л. Г. Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием: Справочник //М.: Машиностроение. – 1987. – Т. 1. – С. 328.
126. Мартыненко О. В. Исследование влияния геометрических параметров деформирующих роликов на качество поверхностного слоя при обработке поверхностным пластическим деформированием: дис. ... канд-та. техн. наук : 05.03.01. - Волгоград., 2003. - 178 с.
127. Браславский В. М. Технология обкатки крупных деталей роликами [Текст]. – 1975.
128. Бобровский Н.М., Мельников П.А., Бобровский И.Н., Ежелев А.В., Лукьянов А.А. Технологическое обеспечение трибологических свойств сальниковых шеек деталей машин // Известия Самарского научного центра РАН. 2012, том 14.№1(2).С. 340-343.
129. Блюменштейн В. Ю., Кречетов А. А. Исследование накопления деформаций и исчерпания запаса пластичности при ППД с использованием ультразвукового контроля //Упрочняющие

технологии и покрытия. – 2007. – №. 10. – С. 40-43.

130. Митрофанова К. С., Блюменштейн В. Ю. Анализ влияния запаса пластичности на накопление деформаций при ППД сложнопрофильным инструментом //УПРОЧНЯЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ И ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ПОКРЫТИЯ В МАШИНОСТРОЕНИИ. – 2017. – С. 111-111.

131. Блюменштейн В.Ю., Митрофанова К.С. Анализ влияния запаса пластичности на накопление деформаций при ппд сложнопрофильным инструментом. УПРОЧНЯЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ И ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ПОКРЫТИЯ В МАШИНОСТРОЕНИИ сборник трудов III Всероссийской молодежной научно-практической конференции. - 2017. - С.111-1-111-4.

132. Радченко С. Ю. и др. Математическая модель упрочняющей обработки внутренней поверхности деталей типа втулок интенсивной пластической деформацией в условиях комплексного локального нагружения очага деформации //Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2013. – №. 5. – С. 40-47.

133. Валиев Р.З., Александров И.В. Наноструктурные материалы, полученные интенсивной пластической деформацией М.: Логос. – 2000. С.272.

134. Голенков В. А. и др. К вопросу о повышении эксплуатационных характеристик полых осесимметричных деталей машин методами интенсивной пластической деформации //Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2012. – №. 6. – С. 71.

135. Rahman M. et al. A multiprocess machine tool for compound micromachining //International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2010. – Vol. 50. – Iss. 4. – P. 344-356.

136. Lauwers B. Surface integrity in hybrid machining processes //Procedia Engineering. – 2011. – Vol. 19. – P. 241-251.

137. Блюменштейн В. Ю. Исследование качества поверхностного слоя деталей машин после размерного совмещенного обкатывания :дис. ... канд. техн. наук : 05.02.08. - М., 1979. – 254 с.

138. Ярославцев В.М. Резание с опережающим пластическим деформированием в технологиях утилизации металлической стружки. Наука и образование. Научное издание МГТУ имени Н.Э.Баумана. – 2013. – №7. –С. 79-90.

139. Tang J., Luo H. Y., Zhang Y. B. Enhancing the surface integrity and corrosion resistance of Ti-6Al-4V titanium alloy through cryogenic burnishing //The international journal of advanced manufacturing technology. – 2017. – Vol. 88. – Iss. 9. – P. 2785-2793.

140. Guo Q. et al. Synthesis, corrosion, and wear resistance of a black microarc oxidation coating on pure titanium //Surface and Coatings Technology. – 2020. – Vol. 386. – P. 125454.

141. Wang C. et al. Enhanced wear resistance of 316 l stainless steel with a nanostructured surface layer prepared by ultrasonic surface rolling //Coatings. – 2019. – Vol. 9. – Iss. 4. – P. 276.

142. Muñoz-Cubillos J., Coronado J. J., Rodríguez S. A. On the cavitation resistance of deep rolled surfaces of austenitic stainless steels //Wear. – 2019. – Vol. 428. – P. 24-31.

143. Рахимьянов Х. М., Семенова Ю. С., Третьяков М. А. Повышение качества поверхностного слоя деталей с покрытиями малой толщины из нанокристаллических порошков ультразвуковым пластическим деформированием //Обработка металлов: технология, оборудование, инструменты. – 2011. – №. 3 (52). – С. 18-22.
144. Довгалев, А. М. . Магнитно- динамическое упрочнение плоских поверхностей / А . М. Довгалев , С. А . Сухоцкий, Д . М. Свирепа // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : материалы междунар. науч .- техн . конф. – Могилев : Беларус.- Рос.ун- т, 2007. – Ч . 1. – С. 93.
145. Кокорева О.Г. Статико-импульсная обработка – инновационные метод упрочнения тяжело нагруженных поверхностей деталей машин / Современные наукоемкие технологии – 2011. - №14. - С. 35-37.
146. Tsao C. C., Chiu Y. C. Evaluation of drilling parameters on thrust force in drilling carbon fiber reinforced plastic (CFRP) composite laminates using compound core-special drills //International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2011. – Vol. 51. – Iss. 9. – P. 740-744.
147. Boozarpour M., Teimouri R. Parametric study of multi-roller rotary burnishing process //International Journal of Lightweight Materials and Manufacture. – 2021. – Vol. 4. – Iss. 2. – P. 179-194.
148. Wang H. et al. Process Analysis and Roller Optimization of Micro-Groove Multi-Pass Rolling. – 2021.
149. Hemanth S. et al. Design of roller burnishing tool and its effect on the surface integrity of Al 6061 //Materials Today: Proceedings. – 2018. – Vol. 5. – Iss. 5. – P. 12848-12854.
150. Gharbi F. et al. Ductility improvement of aluminum 1050A rolled sheet by a newly designed ball burnishing tool device //The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2012. – Vol. 60. – Iss.1. – P. 87-99.
151. Chui P. et al. Effect of surface nanocrystallization induced by fast multiple rotation rolling on hardness and corrosion behavior of 316L stainless steel //Applied Surface Science. – 2011. – Vol. 257. – Iss. 15. – P. 6787-6791.
152. Luo H. et al. Investigation of the burnishing process with PCD tool on non-ferrous metals //The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2005. – Vol. 25. – Iss. 5. – P. 454-459.
153. Świrad S. et al. Influence of hydrostatic burnishing strategy on the surface topography of martensitic steel //Measurement. – 2019. – Vol. 138. – P. 590-601.
154. Slavov S. D., Iliev I. V. Research on the variability of the burnishing force during processing surfaces with 3D shape by using simultaneous 5-axis ball-burnishing process implemented on CNC milling machine. – 2017.

155. Zhao J. et al. Ultrasonic-induced phase redistribution and acoustic hardening for rotary ultrasonic roller burnished Ti-6Al-4V //Metallurgical and Materials Transactions A. – 2020. – Т. 51. – №. 3. – С. 1320-1333.
156. Радченко, В. П. Феноменологический метод расчета остаточных напряжений и пластических деформаций в полой поверхностно упрочненном цилиндрическом образце / В. П. Радченко, М. Н. Саушкин // Прикладная математика и механика. – 2013. – Т. 77. – № 1. – С. 143-152. – EDN PXJMRD.
157. Hiegemann L. et al. Analytical prediction of roughness after ball burnishing of thermally coated surfaces //Procedia Engineering. – 2014. – Vol. 81. – P. 1921-1926.
158. Teimouri R., Amini S., Ashrafi H. An analytical model of burnishing forces using slab method //Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering. – 2019. – Vol. 233. – Iss. 3. – P. 630-642.
159. Li F. L. et al. Analytical prediction and experimental verification of surface roughness during the burnishing process //International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2012. – Vol. 62. – P. 67-75.
160. Кузнецов В.П., Горгоц В.Г. Математическое моделирование нелинейной динамики процесса упругого выглаживания поверхностей деталей // Вестник машиностроения. – 2008. – No 12. – С. 61–65.
161. Лебедев В. А., Чумак И. В. Кинетическая модель упрочнения поверхностного слоя деталей виброударными методами ППД //Упрочняющие технологии и покрытия. – 2008. – №. 7. – С. 3-8.
162. Зайдес С. А. От кинематики рабочего инструмента к новым процессам отделочно-упрочняющей обработки //Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2019. – Т. 23. – №. 5 (148). – С. 863-873.
163. Rotella G. et al. Finite element modelling of combined turning/burnishing effects on surface integrity of Ti6Al4V alloy //The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2022. – Т. 119. – №. 1. – С. 177-187.
164. Maximov J. T. et al. Improvement in fatigue strength of 41Cr4 steel through slide diamond burnishing //Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering. – 2020. – Vol. 42. – Iss. 4. – P. 1-20.
165. Shen X. et al. An investigation of stress condition in vibration-assisted burnishing //The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2019. – Vol. 105. – Iss. 1. – P. 1189-1207.
166. Sayahi M., Sghaier S., Belhadjsalah H. Finite element analysis of ball burnishing process: comparisons between numerical results and experiments //The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2013. – Vol. 67. – Iss. 5. – P. 1665-1673.

167. Деформирующая обработка валов: монография / С.А. Зайдес, В.Н. Емельянов, М.Е. Попов, Е.Ю. Кропоткина, А.С. Бубнов; под ред. С.А. Зайдеса. – Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2013. – 452 с. – ISBN 978-508038-0869-5.
168. Сидякин Ю.И., Трунин А.В., Шевцов А.Н. Сферическая модель исследования контактной упругопластической деформации // Известия ВолгГТУ. – 2010. – No 12 (72). – С. 48–52. – (Серия: Прогрессивные технологии в машиностроении; вып. 6).
169. Зайдес С.А., ФамДакФыонг. Оценка напряженно-деформированного состояния цилиндрических деталей после поперечной обкатки плоскими плитами// Научные технологии в машиностроении. 2017. No5 71). С. 38–43.
170. Ингеманссон А. Р. и др. Математическая модель формирования шероховатости обработанной поверхности при точении с опережающим пластическим деформированием коррозионно-стойких сталей //Металлообработка. – 2012. – №. 1 (67). – С. 11-15.
171. Korzynski M. Modeling and experimental validation of the force–surface roughness relation for smoothing burnishing with a spherical tool //International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2007. – Т. 47. – №. 12-13. – С. 1956-1964.
172. Kuznetsov V. P., Gorgots V. G. Nonlinear dynamics of the elastic smoothing of surfaces //Russian Engineering Research. – 2008. – Т. 28. – №. 12. – С. 1201-1206.
173. Сидякин Ю. И., Бочаров Д. А. Повышение циклической прочности галтелей ступенчатых валов обкаткой роликами или шариками //Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2009. – №. 8. – С. 37-40.
174. Шведова А. С. Методика прогнозирования повышения эксплуатационных свойств деталей динамическими методами ППД / А. С. Шведова, В. В. Остроух, М. Ю. Щерба // Состояние и перспективы развития сельскохозяйственного машиностроения : сб. трудов Междунар. конф. «Интерагромаш - 2014». — Ростов-на-Дону, 2014. — С. 175–178.
175. Кузнецов В. П. и др. Конечно-элементное моделирование наноструктурирующего выглаживания //Физическая мезомеханика. – 2011. – Т. 14. – №. 6. – С. 87-97. //Engineering Transactions. – 2013. – Т. 61. – №. 1. – С. 3-13.
176. Kuznetsov V. P., Tarasov S. Y., Dmitriev A. I. Nanostructuring burnishing and subsurface shear instability //Journal of Materials Processing Technology. – 2015. – Т. 217. – С. 327-335.
177. Ярославцев В. М. Резание с опережающим пластическим деформированием в технологиях утилизации металлической стружки //Машиностроение и компьютерные технологии. – 2013. – №. 07. – С. 79-90.
178. Зайдес С. А., Климова Л. Г. Управление технологическими остаточными напряжениями в маложестких валах охватывающим деформированием //Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2006. – Т. 4. – №. 4 (28). – С. 46-51.

179. Зайдес С. А. Новые способы поверхностного пластического деформирования при изготовлении деталей машин //Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. ГИ Носова. – 2018. – Т. 16. – №. 3. – С. 129-139.
180. Кыюнг Н. К. Повышение качества малоожестких валов поверхностным пластическим деформированием в стесненных условиях : дис. – Иркутск.–2018. – 149 С.
181. Yen Y. C., Sartkulvanich P., Altan T. Finite element modeling of roller burnishing process //CIRP annals. – 2005. – Т. 54. – №. 1. – С. 237-240.
182. Liou J. J., El-Wardany T. I. Finite element analysis of residual stress in Ti-6Al-4V alloy plate induced by deep rolling process under complex roller path //International Journal of Manufacturing Engineering. – 2014. – Т. 2014.
183. Махалов, М. С. Совершенствование технологии упрочняющей обработки деталей машин размерным совмещенным обкатыванием : специальность 05.02.08 «Технология машиностроения» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Махалов Максим Сергеевич. – Кемерово, 2007. – 298 с.
184. Блюменштейн В.Ю. Махалов М.С. Механика процесса поверхностного пластического деформирования. Модель упрочняемого упругопластического тела. Обработка металлов (Технология. Оборудование. Инструменты.). – 2018.–Том 20. – № 4. – С. 6-20.
185. Митрофанова К. С. Уточненная конечно-элементная модель процесса отделочно-упрочняющей обработки сложнопрофильным инструментом //Инновации в технологиях и образовании. – 2020. – С. 214-219.
186. Krechetov A., Mitrofanova K. The study of multiradius roller running process. / A. Krechetov, K. Mitrofanova // Matec Web Of Conferences. X International scientific and practical conference "Innovations in mechanical engineering". (ISPCIME-2019). – 2019. – P. 05003.
187. Митрофанова К. С., Блюменштейн В. Ю. Анализ напряженно-деформированного состояния в очаге деформации при обработке поверхностным пластическим деформированием //УПРОЧНЯЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ И ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ПОКРЫТИЯ В МАШИНОСТРОЕНИИ. – 2018. – С. 241-244.
188. Блюменштейн В. Ю., Митрофанова К. С. Моделирование процесса упрочняющего обкатывания сложнопрофильным инструментом //Инновации в машиностроении. – 2017. – С. 528-537.
189. Митрофанова К. С., Блюменштейн В. Ю. Анализ влияния запаса пластичности на накопление деформаций при ППД сложнопрофильным инструментом //УПРОЧНЯЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ И ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ПОКРЫТИЯ В МАШИНОСТРОЕНИИ. – 2017. – С. 111-111.
190. Колмогоров В.Л. Пластичность и разрушение / под ред. В.Л. Колмогорова. – М.: Металлургия, 1977. – 337 с.

191. Богатов А.А. и др. Методики определения технологических свойств металла и его отдельных составляющих в условиях сложного нагружения / А.А. Богатов, С.В. Смирнов, В.П. Швейкин, А.В. Нестеренко // Известия ВУЗов. Цветная металлургия. – 1995. – № 1. – С. 42–49.
192. Смирнов С.В., Швейкин В.П. Пластичность и деформируемость углеродистых сталей при обработке давлением. – Екатеринбург: УрО РАН, 2009. – 255 с.
193. Сивак Р.И., Карватко О.В., Ивацко В.Т. Накопление повреждений при поверхностной пластической деформации / Р. И. Сивак, О. В. Карватко, и В. Т. Ивацко // ВісникДонбаської державної машинобудівної академії: збірник наукових праць. – 2006. – №1 (3), – С. 18-20.
194. Береснев Б.И., Мартынов Е. Д., Родионов К.П. и др. Пластичность и прочность твердых тел при высоком давлении / Б.И. Береснев, Е. Д. Мартынов, К.П. Родионов и др. // - М.: Наука, - 1970. – 162 с.
195. Burt H., Dennison J.P., Elliot I.G., Wilshire B. The effect of hot isostatic pressing on the creep and fracture behaviour of the cast superalloy / H. Burt, J.P. Dennison, I.G. Elliot, B. Wilshire. // Materials Science and Engineering. – 1982. – Vol. 53, – Iss. 2. – P. 245-250.
196. Пластичность и прочность твердых тел при высоких давлениях / Б. И. Береснев, Е. Д. Мартынов, К. П. Родионов и др. – М.: Наука, 1969. – 161 с.
197. Bridgman P. W. Effects of High Shearing Stress Combined with High Hydrostatic Pressure / P. W. Bridgman // Phys. Rev. – 1935. – Vol. 48. – Iss. 10. – P. 825.
198. Markushev M.V. On the methods of severe plastic deformation for bulk nanomaterials processing / M.V. Markushev. // Lett. Mater., 2011, 1(1) 36-42
199. Erbel S. Mechanical properties and structure of extremely strainhardened copper / S. Erbel // Metals Technology. Taylor & Francis. – 1979. – P. 482-486.
200. Страумала Б. Б., Кильмаметов А. Р. и др. Фазовые превращения в твердых растворах медь–олово при кручении под высоким давлением / Б. Б. Страумала, А. Р. Кильмаметов, И. А. Мазилкин, А. Корнева, П. Земба, Б. Барецки // Письма в ЖЭТФ. 2019. Т. 110. Вып. 9. P. 622-627.
201. Валиев Р.З., Александров И.В. Наноструктурные материалы, полученные интенсивной пластической деформацией М.: Логос, 2000. 272 с.
202. Figueiredo, R.B., Langdon, T.G. Evaluating the Superplastic Flow of a Magnesium AZ31 Alloy Processed by Equal-Channel Angular Pressing (2013) Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science, pp. 1-8. Article in Press.
203. Chrominski, W., Kulczyk, M., Siwek, M., Lewandowska, M. Tailoring microstructure and mechanical properties of 6063 aluminium alloy for lightweight structural parts (2013) Materials Science Forum, 765, pp. 388-392.

204. Santamaría, J.A., Alkorta, J., Sevillano, J.G. Mechanical properties of PBTE processed by HPT (high-pressure torsion) (2014) Materials Science and Technology Conference and Exhibition 2013, MS and T 2013, 4, pp. 2623-2629.
205. Liu, B., Liu, R., Li, Q.-J., Yao, M.-G., Zou, B., Cui, T., Liu, B.-B., Liu, J. Study of high pressure structural stability of CeO₂ nanoparticles (2013) Chinese Physics C, 37 (9), art.no. 098003.
206. Салищев Г.А., Галеев Р.М., Малышева С.П., Жеребцов С.В. Миронов С.Ю., Валихметов О.Р., Иванисенко Э.В. Формирование субмикроструктурной структуры в титане и титановых сплавах и их механические свойства // МИТОМ. 2006. № 2. P. 19-26.
207. Salishcheva G.A., Imayeva R.M. et al. Formation of a submicrocrystalline structure in TiAl and Ti₃Al intermetallics by hot working / G.A.Salishcheva, R.M.Imayeva, O.N.Senkovb, V.M.Imayeva, N.K.Gabdullina, M.R.Shagieva, A.V.Kuznetsova, F.H.Froesb // Materials Science and Engineering: A. 2000. Vol. 286.Iss. 2. P.236-243.
208. Estrin Y., Vinogradov A. Extreme grain refinement by severe plastic deformation: A wealth of challenging science // Acta Mater. 2013. V. 61. № 3. P. 782-817.
209. M.V. Markushev, M.Yu. Murashkin. In: Aluminium Alloys. Their Physical and Mechanical Properties, eds.J.Hirsch, B.SkrotzkiandG.Gottstein, DGM, v.2, 2008,P.1518.
210. Рахимьянов Х. М., Семенова Ю. С. Прогнозирование геометрического состояния поверхности цилиндрических деталей из стали 45 при ультразвуковом поверхностном пластическом деформировании //Обработка металлов: технология, оборудование, инструменты. – 2011. – №. 3 (52). – С. 11-17.
211. Минько Д. В., Шиманович О. А. Применение электроимпульсного воздействия в процессе пластического деформирования тугоплавких металлов. – 2022.
212. Wandra R., Prakash C., Singh S. Investigation on surface roughness and hardness of β -Ti alloy by ball burnishing assisted electrical discharge cladding for bio-medical applications //Materials Today: Proceedings. – 2022. – Т. 50. – С. 848-854.
213. Tsao C. C., Chiu Y. C. Evaluation of drilling parameters on thrust force in drilling carbon fiber reinforced plastic (CFRP) composite laminates using compound core-special drills //International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2011. – Vol. 51. – Iss. 9. – P. 740-744.
214. Lai F. et al. The influence of ultrasonic surface rolling on the fatigue and wear properties of 23-8N engine valve steel //International Journal of Fatigue. – 2019. – Т. 125. – С. 299-313.
215. Zhang Y. L. et al. Effect of ultrasonic surface rolling on microstructure and rolling contact fatigue behavior of 17Cr2Ni2MoVNb steel //Surface and Coatings Technology. – 2019. – Т. 366. – С. 321-330.

216. Ren Z. et al. Effect of ultrasonic surface rolling on surface layer properties and fretting wear properties of titanium alloy Ti5Al4Mo6V2Nb1Fe //Surface and Coatings Technology. – 2020. – T. 389. – C. 125612.
217. Lei L. et al. Gradient nanostructure, phase transformation, amorphization and enhanced strength-plasticity synergy of pure titanium manufactured by ultrasonic surface rolling //Journal of Materials Processing Technology. – 2022. – T. 299. – C. 117322.
218. Xu X. et al. Mechanical and corrosion fatigue behaviors of gradient structured 7B50-T7751 aluminum alloy processed via ultrasonic surface rolling //Journal of Materials Science & Technology. – 2020. – T. 40. – C. 88-98.
219. Lu L. X. et al. Study on surface characteristics of 7050-T7451 aluminum alloy by ultrasonic surface rolling process //The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2016. – T. 87. – №. 9. – C. 2533-2539.
220. Geng J. et al. Microstructure and mechanical properties of AZ31B magnesium alloy via ultrasonic surface rolling process //Advanced Engineering Materials. – 2021. – T. 23. – №. 9. – C. 2100076.
221. Zhou M. et al. Microstructures and mechanical properties of Mg-15Gd-1Zn-0.4 Zr alloys treated by ultrasonic surface rolling process //Materials Science and Engineering: A. – 2021. – T. 828. – C. 141881.
222. Liu D. et al. Contribution of ultrasonic surface rolling process to the fatigue properties of TB8 alloy with body-centered cubic structure //Journal of Materials Science & Technology. – 2021. – T. 61. – C. 63-74.
223. Zhang Q. et al. Microstructure and surface properties of 17-4PH stainless steel by ultrasonic surface rolling technology //Surface and Coatings Technology. – 2017. – T. 321. – C. 64-73.
224. Dang J. et al. Surface integrity and wear behavior of 300M steel subjected to ultrasonic surface rolling process //Surface and Coatings Technology. – 2021. – T. 421. – C. 127380.
225. Lei L. et al. Gradient nanostructure, phase transformation, amorphization and enhanced strength-plasticity synergy of pure titanium manufactured by ultrasonic surface rolling //Journal of Materials Processing Technology. – 2022. – T. 299. – C. 117322.
226. Xia T. et al. Enhanced corrosion resistance of a Cu10Ni alloy in a 3.5 wt% NaCl solution by means of ultrasonic surface rolling treatment //Surface and Coatings Technology. – 2019. – T. 363. – C. 390-399.
227. Ye H. et al. Effect of ultrasonic surface rolling process on mechanical properties and corrosion resistance of AZ31B Mg alloy //Surface and Coatings Technology. – 2019. – T. 372. – C. 288-298.

228. Liu D. et al. Surface nanocrystallization of 17-4 precipitation-hardening stainless steels subjected to ultrasonic surface rolling process // *Materials Science and Engineering: A*. – 2018. – Vol. 726. – P. 69-81.
229. Liu J. et al. Microstructure evolution in Ti64 subjected to laser-assisted ultrasonic nanocrystal surface modification // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. – 2019. – Т. 136. – С. 19-33.
230. Xie J. et al. Microstructure and mechanical properties of high entropy CrMnFeCoNi alloy processed by electropulsing-assisted ultrasonic surface rolling // *Materials Science and Engineering: A*. – 2020. – Т. 795. – С. 140004.
231. Sun Z. et al. effect of electropulsing on surface mechanical behavior and microstructural evolution of inconel 718 during ultrasonic surface rolling process // *Journal of Materials Engineering and Performance*. – 2019. – Т. 28. – №. 11. – С. 6789-6799.
232. Amanov A. et al. Effect of combined shot peening and ultrasonic nanocrystal surface modification processes on the fatigue performance of AISI 304 // *Surface and Coatings Technology*. – 2019. – Т. 358. – С. 695-705.
233. Рудяк Н. С., Зданович Е. Н., Акулович Л. М. Микротвердость поверхностных слоев после магнитно-электрического упрочнения и лазерной обработки. – 2021.
234. Рахимьянов Х. М., Семенова Ю. С. Прогнозирование геометрического состояния поверхности цилиндрических деталей из стали 45 при ультразвуковом поверхностном пластическом деформировании // *Обработка металлов: технология, оборудование, инструменты*. – 2011. – №. 3 (52). – С. 11-17.
235. Соловьев, А.Г., Лазуткин, А.Г. и др. Упрочнение тяжело нагруженных деталей методом статико-импульсного ППД / Д.Л. Соловьев, А.Г. Лазуткин, А.В. Киричек, С.А. Силантьев // *СТИН*. – 2002. – № 5. – С. 13–15.
236. Киричек, А.В., Соловьев, Д.Л., Кузьменко, А.П. Использование ударных волн деформации для наноструктурирования металлических материалов // *Научно-технические технологии в машиностроении*. – 2015. – № 8. – С. 17-22.
237. Соловьев Д. Л. Технология и оборудование статико-импульсной обработки поверхностным пластическим деформированием : дис. – Орловский государственный технический университет, 2005.
238. Lauwers B. Surface integrity in hybrid machining processes // *Procedia Engineering*. – 2011. – Vol. 19. – P. 241-251.
239. Rami A. et al. Some insights on combined turning-burnishing (CoTuB) process on workpiece surface integrity // *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*. – 2018. – Т. 19. – №. 1. – С. 67-78.

240. Axinte D. A., Gindy N. Turning assisted with deep cold rolling—a cost efficient hybrid process for workpiece surface quality enhancement //Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture. – 2004. – Т. 218. – №. 7. – С. 807-811.
241. Mezlini S. et al. Effect of a combined machining/burnishing tool on the roughness and mechanical properties //Lubrication Science. – 2014. – Т. 26. – №. 3. – С. 175-187.
242. Маркус Л. И., Смелянский В. М. Алмазное выглаживание //М.: НИИ-Автопром. – 1971.
243. Jafari Tadi A, Hosseini S. R., Naderi Semiromi M. Influence of surface nano/ultrafine structure formed via pre-deep rolling process on the plasma nitriding characteristics of the AISI 316L stainless steel. IntNanoLett. - 2017. - Volume 7. - P.217-223.
244. Nikitin, I.: Altenberger, Comparison of the fatigue behavior and residual stress stability of laser-shock peened and deep rolled austenitic stainless steel AISI- 304 in the temperature range 25–600 C°. Mater.Sci. Eng. 465, 176–182 (2007).
245. Altenberger, I., Scholtes, B., Martin, U., Oettel, H.: Cyclic deformation and near surface microstructures of shot peened or deep rolled austenitic stainless steel AISI 304. Mater.Sci. Eng. 264, 1–16 (1999).
246. Abdolreza J.T. Formation of Surface Nano/Ultrafine Structure using Deep Rolling Process on the AISI 316L Stainless Steel. MaterialScience&EngineeringInternationalJournal. – 2017. – Volume 1. – Issue 3. – P.00015-00021.
247. Nagarajan B. et al. Effect of deep cold rolling on mechanical properties and microstructure of nickel-based superalloys //Materials Science and Engineering: A. – 2018. – Т. 728. – С. 196-207.
248. Nalla R. K. et al. On the influence of mechanical surface treatments—deep rolling and laser shock peening—on the fatigue behavior of Ti–6Al–4V at ambient and elevated temperatures //Materials Science and Engineering: A. – 2003. – Т. 355. – №. 1-2. – С. 216-230.
249. Kumar D. et al. Microstructural characteristics and strengthening mechanisms in a polycrystalline Ni-based superalloy under deep cold rolling //Materials Science and Engineering: A. – 2019. – Т. 753. – С. 285-299.
250. Balland P. et al. Mechanics of the burnishing process //Precision Engineering. – 2013. – Т. 37. – №. 1. – С. 129-134.
251. Valiev R.Z. Nanostructuring of metals by severe plastic deformation for advanced properties. Nat.Mater. -2004. – Volume 3. - P.511–516.
252. Классен Н. В. и др. ИССЛЕДОВАНИЯ АКУСТИЧЕСКИХ, ЭЛЕКТРОННЫХ И ОПТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ ДЕФОРМАЦИОННЫХ СВЕРХСТРУКТУР //Ультразвук: проблемы, разработки, перспективы. – 2017. – С. 18-20.

253. Класен Н. В. и др. Особенности градиентных наноструктур, образованных деформированием //Современные методы и технологии создания и обработки материалов. – 2017. – С. 111-122.
254. Kuznetsov V. P., Skorobogatov A. S., Gorgots V. G. Impact of indenter sliding velocity and loading repetition factor on shear strain and structure dispersion in nanostructuring burnishing //Facta Universitatis. Series: Mechanical Engineering. – 2019. – Т. 17. – №. 2. – С. 161-168.
255. Kuznetsov V. P., Tarasov S. Y., Dmitriev A. I. Identification of conditions for nanostructured burnishing and subsurface shear instability //AIP Conference Proceedings. – American Institute of Physics, 2014. – Т. 1623. – №. 1. – С. 331-334.
256. Kuznetsov V. P. et al. The analysis of speed increase perspectives of nanostructuring burnishing with heat removal from the tool //IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2016. – Т. 124. – №. 1. – С. 012127.
257. Kolyvanov E. L., Afonikova N. S., Kobelev N. P. X-ray diffraction tests of near-surface layer of copper treated by ball rolling //Inorganic Materials: Applied Research. – 2018. – Т. 9. – №. 4. – С. 699-702.
258. Jing Z. et al. A gradient nano/micro-structured surface layer on copper induced by severe plasticity roller burnishing //Transactions of Nonferrous Metals Society of China. – 2014. – Т. 24. – №. 2. – С. 441-448.
259. Huang B. et al. Surface layer modification by cryogenic burnishing of Al 7050-T7451 alloy and validation with FEM-based burnishing model //Procedia CIRP. – 2015. – Т. 31. – С. 1-6.
260. Патент РФ № 2530600. Ролик обкатной двухрадиусный: пат. 2530600 Рос. Федерация. № 2013135794/02; заявл. 30.07.2013; опубл. 10.10.2014, Бюл. № 28 (II ч.). 7 с.
261. Патент РФ № 2529335. Ролик обкатной комбинированный: пат. 2529335 Рос. Федерация. № 2013135796/02; заявл. 30.07.2013; опубл. 27.09.2014, Бюл. № 27 (II ч.). 6 с.
262. Патент РФ № 2557377. Ролик обкатной мультирадиусный: пат. 2557377 Рос. Федерация. № 2013135797/02; заявл. 20.07.2015; опубл. 27.05.2016, Бюл. № 27 (II ч.). 6 с.
263. Блюменштейн В. Ю., Митрофанова К. С. Исследование влияния технологических факторов процесса поверхностного пластического деформирования сложно профильным инструментом на качество поверхностного слоя //Упрочняющие технологии и покрытия. – 2020. – Т. 16. – №. 2. – С. 68-74.
264. Митрофанова К. С. ВЛИЯНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ МУЛЬТИРАДИУСНЫМ РОЛИКОМ НА СТРУКТУРНО-ФАЗОВОЕ СОСТОЯНИЕ И МИКРОТВЕРДОСТЬ ОБРАЗЦОВ ИЗ СТАЛИ 45 //Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2022. – №. 3 (151). – С. 4-12.

265. Blumenstein V. Y., Mitrofanova K. S. Study on the Effects of Hydrostatic Pressure on the Structural State of Pure-Iron During Hardening Treatment with a Multiradius Roller //Solid State Phenomena. – Trans Tech Publications Ltd, 2022. – Т. 328. – С. 17-25.
266. Mitrofanova K. S. Study of Surface Layer Hardening after Treatment Complex Tool //Solid State Phenomena. – Trans Tech Publications Ltd, 2020. – Т. 303. – С. 89-96.
267. Сторожев М. В., Попов Е. А. Теория обработки металлов давлением. – 1971.
268. Блюменштейн В. Ю., Кречетов А. А. Наследственная механика поверхностного слоя деталей машин. – 2002.
269. Блюменштейн В. Ю., Кречетов А. А. Расчет параметров напряженно-деформированного состояния (RNDS_MDS). – 2002.
270. ГОСТ 5639-82.Стали и сплавы. Методы выявления и определения величины зерна.
271. Сканирующий зондовый микроскоп Solver PRO. Руководство пользователя. М.: ЗАО «Нанотехнология-МДТ», 2006. 341 с.
272. Уманский Я.С., Скаков Ю.А., Иванов А.Н. Кристаллография, рентгенография и электронная микроскопия. Москва: Металлургия, 1982. 632 с.
273. Горелик С.С., Скаков Ю.А., Расторгуев Л.Н. Рентгенографический и электронно-оптический анализ: учебное пособие для вузов, 3-е изд., доп. и перераб. Москва: МИСиС, 1994. 328 с.
274. Миркин Л.И. Справочник по рентгеноструктурному анализу поликристаллов. Москва: Изд. физ.-мат. литературы, 1961. 684 с.
275. Боровиков, В. П. Популярное введение в современный анализ данных в системе STATISTICA : Учебное пособие для вузов / В. П. Боровиков. – Москва : Горячая линия–Телеком, 2013. – 288 с.
276. Чоудхури М. Разработка расчетной модели формирования остаточных напряжений и методики их технологического обеспечения при обработке деталей обкатыванием и выглаживанием: дис. ... канд. техн. наук : 05.02.08. – М.– 1988.–200 с.
277. Sayahi M., Sghaier S., Belhadjsalah H. Finite element analysis of ball burnishing process: comparisons between numerical results and experiments. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. –2012. –Vol. 67 (5). –pp. 1665–1673. – DOI: 10.1007/s00170-012-4599-9.
278. Yi S. et al. Analyzing the near surface deformation gradients due to shot peening and ball-burnishing of alpha brass and stainless steel //ICSP. – 2008. – Т. 10. – С. 169.
279. Sunny S. et al. Effects of microstructure and inherent stress on residual stress induced during powder bed fusion with roller burnishing //International Journal of Mechanical Sciences. – 2022. – Т. 219. – С. 107092.

280. Hughes D. A., Korellis J. S. High load sliding, deformation microstructures, strength, and hardening for cutting and metal forming //International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2021. – Т. 168. – С. 103766.
281. Иванов, Ю. Ф. Структурно-фазовые состояния и механизмы упрочнения деформированной стали [Текст] / Ю. Ф. Иванов, В. Е. Громов, Н. А. Попова, С. В. Коновалов, Н. А. Конева. – Новокузнецк: Полиграфист, 2016. – 510 с.
282. Киричек, А. В. Технология и оборудование статико-импульсной обработки поверхностным пластическим деформированием / А. В. Киричек, Д. Л. Соловьев, А. Г. Лазуткин // – Москва : Машиностроение, 2004. – 287 с. – (Современные технологии-современному производству). – ISBN 5-217-03245-6. – EDN OWDGXC.

ПРИЛОЖЕНИЕ



650021, г. Кемерово, ул. Стахановская 1-я д.40, оф.2

тел: (3842) 761707, e-mail: MachServic@ya.ru

ИНН 4205237946 КПП 420501001

Акт

об использовании результатов диссертационной работы К.С. Митрофановой «Технологическое обеспечение качества поверхностного слоя деталей машин методом поверхностного пластического деформирования мультирадиусным роликом»

Результаты диссертационной работы использованы при разработке технологического процесса изготовления и восстановления защитной втулки центробежного насоса в условиях ООО «МАШСЕРВИС».

Разработаны технологическая документация, специальная оснастка и применены оригинальные технические решения по применению мультирадиусного ролика. Отработаны и предложены режимы финишной отделочно-упрочняющей обработки поверхностным пластическим деформированием мультирадиусным роликом, включая: усилие, (Р, Н) 1500; подача, (S, мм/об) 0,07; частота вращения, (n, об/мин) 630.

Реализация проектного варианта технологического процесса позволила обеспечить требуемую точность и качество поверхностного слоя после обработки: материал 12X18H9T-6 ГОСТ 5949-2018; микротвердость повысилась на 45%; глубина упрочнения составила 3,5-3,8 мм; шероховатость поверхности Ra не превысила 0,23 мкм.

Повышение долговечности изделия в условиях циклического нагружения составило не менее, чем 2,4 раза. Предложенные решения в совокупности позволили расширить номенклатуру выпускаемой продукции, внедрить новые для предприятия методы финишной отделочно-упрочняющей обработки.

Суммарный годовой эффект, обусловленный экономией материальных и экономических ресурсов, составил 450 тыс. руб. в год.

Генеральный директор
ООО «Завод «МашСервис»

Д.А. Янкович



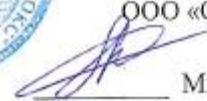


Общество с ограниченной ответственностью «ОКС»
 123100, Россия, г. Москва, ул. Мантулинская, дом 20, комн. 2, пом. III
 ИНН/КПП 4205281286/770301001
 [реакция ООО «ОКС» от 22.10.19]



Утверждаю:

Исполнительный директор
 ООО «ОКС»


 Михайлов Д.С.
 «01» 12 2022 г.

Акт

об использовании результатов диссертационной работы К.С. Митрофановой «Технологическое обеспечение качества поверхностного слоя деталей машин методом поверхностного пластического деформирования мультирадиусным роликом»

Результаты диссертационной работы использованы в условиях мелкосерийного производства ООО «ОКС» при разработке технологических процессов изготовления деталей горно-шахтного оборудования и технологической оснастки.

Спроектировано, изготовлено и внедрено специальное приспособление, используемое на токарных станках с ЧПУ. Внедрена новая для предприятия технология поверхностного пластического деформирования мультирадиусным роликом, что позволило исключить из структуры технологического процесса операцию термической обработки.

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; твердость по Виккерсу 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.

Суммарный годовой эффект, обусловленный экономией материальных и экономических ресурсов, составил 380 тыс. руб. в год.

Технический директор

 Крестинайтис А.В.