

Северо-Казахстанский университет им. М. Козыбаева

УДК 621.787.4

На правах рукописи

БЕРИКБАЕВА МЕРУЕРТ АМИРХАНОВНА

**Повышение качества внутренней поверхности гидроцилиндров путем
комбинированной обработки**

6D071200 – Машиностроение

Диссертация на соискание степени
доктора философии (PhD)

Научный консультант
доктор PhD
Т.Ю. Ратушная

Научный консультант
доктор технических наук,
профессор
Е.Ф. Лазуга
(Россия)

Республика Казахстан
Петропавловск, 2024

СОДЕРЖАНИЕ

НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ	4
ОПРЕДЕЛЕНИЯ	5
ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ	6
ВВЕДЕНИЕ	7
1 ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ПРИ ОБРАБОТКЕ ОТВЕРСТИЙ	13
1.1. Анализ особенностей окончательной обработки отверстий.....	13
1.2 Классификация методов обработки и инструментов для окончательной обработки отверстий.....	14
1.3 Постановка задачи для обеспечения качества обработки отверстий гидроцилиндров.....	17
1.4 Анализ способов обеспечения эксплуатационных свойств.....	19
1.5 Современные направления исследований по вопросам повышения качества поверхностного слоя.....	22
Выводы по первому разделу.....	27
2 ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА КОМБИНИРОВАННОЙ ОБРАБОТКИ ГЛАДКИХ ОТВЕРСТИЙ	28
2.1 Перспективность обработки комбинированным инструментом.....	28
2.2 Анализ основных параметров процесса обработки.....	31
2.3 Исследование силовых зависимостей при комбинированной обработке.....	37
2.4 Анализ упрочнения поверхностного слоя при обработке ППД.....	41
2.5 Исследование глубины наклепа.....	46
2.6 Анализ упрочнения металла поверхностного слоя при обработке резанием.....	49
2.7 Остаточные напряжения в поверхностном слое при процессе ППД....	52
2.8 Механизм образования микронеровностей обработанной поверхности.....	57
Выводы по второму разделу.....	63
3 ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ КОМБИНИРОВАННОГО ИНСТРУМЕНТА И РЕЖИМОВ ОБРАБОТКИ НА КАЧЕСТВО ПОВЕРХНОСТИ	65
3.1 Разработка оптимальной формы деформирующего элемента.....	65
3.2 Экспериментальные исследования влияния натяга на качество поверхностного слоя.....	73
3.3 Исследование влияния подачи на качество поверхности.....	79
3.4 Исследования влияния натяга на изменение размеров детали.....	81
3.5 Моделирование комбинированного инструмента.....	87
Выводы по третьему разделу.....	94
4 РЕЗУЛЬТАТЫ ПРАКТИЧЕСКОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ	96
4.1 Разработка методики проектирования комбинированной развертки...	96

4.2 Предложения по рациональной эксплуатации комбинированных разверток.....	97
4.3 Увеличение стойкости комбинированного инструмента.....	99
Выводы по четвертому разделу.....	103
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	104
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	106
ПРИЛОЖЕНИЕ А – Патент на полезную модель.....	115
ПРИЛОЖЕНИЕ Б – Чертёжи гидравлического цилиндра.....	116
ПРИЛОЖЕНИЕ В – Конструкторская документация комбинированной развертки.....	119
ПРИЛОЖЕНИЕ Г – Выбор технологического оборудования и инструмента.....	120
ПРИЛОЖЕНИЕ Д – Последовательность обработки поверхностей корпуса инструмента.....	122

НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ

В настоящей диссертации использованы ссылки на следующие стандарты:

Инструкция по оформлению диссертации и автореферата. Высшая аттестационная комиссия МОН РК, от 28 сентября 2004 года, №377-3ж.

ГОСТ 7.32-2001. Отчет о научно-исследовательской работе. Структура и правила оформления.

ГОСТ 7.1-2003. Библиографическая запись. Библиографическое описание. Общие требования и правила составления.

ГОСТ 2789-73. Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики.

ГОСТ 6540–68 (СТ СЭВ 3936-82). Гидроцилиндры и пневмоцилиндры. Ряды основных параметров.

ГОСТ 27964-88. Измерение параметров шероховатости. Термины и определения.

ГОСТ 17752-81. Гидропривод объемный и пневмопривод. Термины и определения.

ГОСТ 25346-2013. Основные нормы взаимозаменяемости.

ГОСТ 8731-74. Трубы стальные бесшовные горячедеформированные.

ГОСТ 8732-78. Трубы стальные бесшовные горячедеформированные.

ГОСТ 2789-73. Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики.

ГОСТ 1050-2013.Metalлопродукция из нелегированных конструкционных качественных и специальных сталей. Общие технические условия.

ГОСТ 9450-76. Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников.

ГОСТ 16344-70. Ролики обкатные. Конструкция и размеры.

ГОСТ 19081-80. Пластины опорные сменные многогранные твердосплавные шестигранной формы. Конструкция и размеры.

ОПРЕДЕЛЕНИЯ

В настоящей диссертации применяют следующие термины с соответствующими определениями:

Шероховатость поверхности – это совокупность неровностей, образующих микрорельеф поверхности детали, возникающая главным образом вследствие пластической деформации поверхностного слоя заготовки при её обработке из-за неровностей режущих кромок инструмента, трения, вырывания частиц материала с поверхности заготовки, вибрации заготовки и инструмента и т.п.

Пластическая деформация – это смещение одних слоев металла относительно других по линиям скольжения, образующимся по дислокациям.

Гидравлический цилиндр – объёмный гидравлический двигатель возвратно-поступательного движения.

Деформация – изменение размеров, формы и конфигурации тела в результате действия внешних или внутренних сил.

Допуск – разность между наибольшими и наименьшими предельными размерами или разность между верхним и нижним отклонениями.

Припуск – слой материала, удаляемый с поверхности заготовки в целях достижения заданных свойств обрабатываемой поверхности детали.

Поверхностное пластическое деформирование — отделочно-упрочняющая обработка, в которой металлическая стружка не образуется, а в поверхностном слое заготовки происходит упругопластическое деформирование.

КОМПАС АРМ FEM – программа моделирования методом конечно-элементного анализа.

DEFORM – программа предназначенная для анализа трехмерного поведения металла, при различных процессах обработки давлением.

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

ПТО	– подъемно-транспортное оборудование
АПП	– автоматизированные производственные процессы
МКЭ	– метод конечных элементов
ГОСТ	– государственный стандарт
ПД	– пластическая деформация
ППД	– поверхностно-пластическая деформация
НДС	– напряженно-деформированное состояние
МКЭ	– метод конечных элементов

ВВЕДЕНИЕ

Развитие машиностроительной отрасли является одним из важных показателей технологического уровня промышленности по всему миру. Машиностроение оказывает эффективное влияние на развитие других смежных отраслей промышленности, обеспечивая занятость большей части населения и конкурентоспособность экономики как регионов, так и государства в целом.

В Казахстане, как и во всем мире, развитие машиностроительной отрасли играет важную роль в экономическом росте. Развитие машиностроения повысит производительность в ряде других секторов промышленности и улучшит технологический и технический уровень на действующих промышленных организациях [1].

Модернизация действующих предприятий современным оборудованием, создание новых предприятий для выпуска конкурентоспособной продукции международного стандарта, решение вопросов по совершенствованию ремонтных производств, является основной для промышленного машиностроения.

Развитие современного отечественного машиностроения и промышленных предприятий регионов, подразумевает совместное развитие современных технологий во всех направлениях отечественной науки, а так же подготовку квалифицированных кадров на всех уровнях производства.

При разработке диссертации была поставлена задача для решения вопроса по анализу и дальнейшей разработки технологии и методики для изготовления гидравлических силовых цилиндров (силовой части), с производственной и научной точек зрения.

Анализ исследований казахстанских [2-10] ученых и зарубежных специалистов [11-17], в области гидравлики в машиностроении, показал, что разработка технологических решений для улучшения и повышения эксплуатационных свойств гидравлических цилиндров в механизированных подъемных устройствах с применением специальных отделочно-упрочняющих методов является актуальной и обуславливается проведением исследований и работ в данном направлении.

Производство конкурентоспособного оборудования и агрегатов для промышленности является основной составляющей, одного из технологически развитых секторов тяжелого машиностроения – горного машиностроения.

Основанием для разработки темы данной диссертационной работы служит решение технологических задач при изготовлении силовых гидравлических агрегатов подъемно-транспортного оборудования, эксплуатируемых в железнодорожном транспорте при ремонте дорог, с применением метода комбинированной обработки поверхности.

Постоянный рост технологического прогресса машиностроительной отрасли, а также увеличение производительности труда устанавливает ряд задач по созданию материально-технической базы.

Решение поставленных задач, для достижения целей, осуществляется внедрением в промышленные комплексы автоматизированные

производственные процессы (АПП), применять современные разработки в области данной науки и техники, и увеличивать механизацию работ на предприятиях. При небольших габаритах современные промышленные машины отличаются высокой энергоемкостью элементов конструкции. Определенно, одним из таких элементов является гидравлический силовой агрегат (гидроцилиндр), который своими характерными показателями считается довольно простым по конструкции, а также достаточно надежным устройством при реализации движения возвратно-поступательного действия, в сравнении с типовыми или схожими типами приводов, например электроприводов [18]. Гидравлический привод – является преобразовательным оборудованием, которое предназначено для движения машин и элементов их механизмов методом сжатия рабочей жидкости и направлением его в систему [19].

Логистика железнодорожного транспорта всегда должна отвечать повышенным требованиям безопасности, чтобы избежать проблем аварий проезжающих составов и поездов, разработка технологии ремонта и восстановления гидравлических цилиндров с применением комбинированного метода обработки для повышения качества рабочей поверхности является востребованной и актуальной.

Планируемый научно-технический уровень разработки, патентных исследований определяется полнотой проведенного литературного обзора патентного поиска по проблемам изготовления, ремонта и восстановления гидравлических цилиндров ПТО, разработкой и выбором методик проведения исследований в данной области, а также проведением и организацией необходимых экспериментов в диссертации.

На аналитической основе открытых источников по патентам рассмотрены основные эффективные методики использования новых технологических решений по обработке гидроцилиндров, а так же технологии и качество производства и ремонта гидравлических цилиндров подъемных машин. В диссертационной работе приведены результаты научного анализа текущего состояния научно-технической проблемы и патентных исследований в области изготовления гидравлических цилиндров.

Сведения о метрологическом обеспечении диссертации

Анализ и исследования по теме разрабатываемой диссертации проводились на базе НАО «Северо-Казахстанский университет им. М. Козыбаева» (Петропавловск).

Измерения параметров проводились на оборудовании кафедры «Транспорт и машиностроение», в лаборатории разрушающего контроля, устройства и приборы для определения шероховатости – портативный профилометр, производитель Китай, устройство для измерения твердости металла – твердомер с динамическим датчиком портативный «МЕД», изготовитель Российская Федерация.

Актуальность исследования. Гидравлические цилиндры являются неотъемлемой частью механизированного комплекса промышленности различных сфер и направлений. Гидравлические цилиндры выполняют функцию опорного элемента при подъеме решетки и обеспечивают удержание

на заданной высоте необходимое время. Таким образом, обоснование и изучение процесса получения отверстий комбинированным инструментом с прогнозируемыми свойствами позволяет, определить границы рационального использования разрабатываемого инструмента на основе стандартных существующих вариантов.

Как следствие, увеличение надежности и долговечности гидроцилиндров для механизированных подъемных устройств и транспортной техники за счёт рационализации действующей конструкции и усовершенствования действующего технологического процесса является актуальной задачей в диссертации:

1. Получение внутренней поверхности обрабатываемых отверстий в деталях типа «тело вращения», отвечающих требованиям повышенной износостойкости, которые находят применение во многих машинах и механизмах, работающих в тяжелых условиях – актуальная задача современных методов металлообработки.

2. Особый научный интерес имеют методы и способы поверхностного пластического деформирования, с применением сборного металлорежущего инструмента для обработки внутренней поверхности цилиндрических деталей на предприятии.

3. Гидравлические цилиндры являются главным узлом при передаче и преобразовании энергии, сопряжения которых обеспечивают работоспособность технологических устройств, по этой причине к рабочим поверхностям предъявляются высокие требования качества для изготовления деталей.

4. Поломке или выходу из строя или гидроцилиндров могут служить агрессивная среда, конструкционные и технологические параметры. При изменении конструктивных параметров недостаточно обеспечивается прочность элементов конструкции стойки, гидроцилиндра, что приводит к разрушениям и деформациям под действием нагрузок. При изменении технологических параметров так же недостаточно обеспечивается требуемая износостойкость основных рабочих сопрягаемых поверхностей, работающих в паре трения, технологическими процессами на этапе изготовления этих деталей на металлорежущих станках.

Цель исследования – разработка инновационной технологии обработки внутренней поверхности гильзы гидроцилиндра с применением комбинированного инструмента для повышения её качества, путем уменьшения шероховатости поверхности гильзы и увеличения твердости поверхностного слоя.

Объект исследования.

Гидравлический цилиндр для подъема и опускания элементов систем подъемно-транспортного оборудования для ремонтных и строительных работ. Устройство работает как в легких, так и в тяжелых условиях таких как запыленность воздуха, изменения окружающей температуры, все условия характерные для разных климатических зон.

Предмет исследования. Ряд факторов, оказывающих большое влияние на надежность гидросиловых цилиндров и срок его эксплуатации.

Задачами исследования, при выполнении научно–исследовательской работы в целом является:

– выполнение анализа конструктивных особенностей и установить критерии качества гидравлических цилиндров, применяемых в машиностроении;

– исследовать технологический процесс обработки гильз гидроцилиндра для обоснования зависимостей, связывающих показатели получаемой поверхности с режимами комбинированной обработки и конструктивными параметрами инструмента;

– разработать компьютерную модель комбинированного инструмента с учетом оптимальных конструктивных параметров его геометрии и определить предельно-допустимые деформации структуры материала для расчета условий предварительно-напряженного состояния;

– усовершенствовать технологический процесс для изготовления гильзы гидравлического цилиндра с применением разработанного инструмента для деформационно–упрочняющего метода обработки внутренней поверхности гильзы.

Методы исследования, используемые в работе, основываются на положениях базовых наук: допуски и посадки, математическая статистика, технология машиностроения, основы конструирования и детали гидравлических машин, теории упруго–пластического деформирования.

Исследования НДС гидравлического цилиндра с использованием программных продуктов и комплексов Solid Works, Deform и КОМПАС-3D проводились на базе лаборатории компьютерного моделирования Северо-Казахстанского университета им. М. Козыбаева.

Научная новизна работы

Заключается в определении связи между условиями эксплуатации и параметрами точности при изготовлении и ремонте гидроцилиндра, позволяющие определить необходимые параметры технологического процесса при изготовлении детали.

Определены зависимости между высотой микронеровностей (R_a), параметры упроченного слоя (R_n) и режимами применяемой комбинированной обработки с оптимальными конструктивными параметрами режущего инструмента;

Разработана модель процесса комбинированной обработки внутренней поверхности отверстия, с обоснованным выбором режимов обработки: скорость V , подача S и глубина резания, t ;

Определены тепловые и силовые характеристики комбинированного инструмента, ориентированного по направлению полезных сил, возникающих в инструменте в процессе резания.

Обоснованы оптимальные конструктивно-технологические параметры технологического процесса обработки внутренней поверхности гильзы гидроцилиндра разработанным комбинированным инструментом.

На основе вышесказанного разработана типовая методика проектирования комбинированных инструментов для обработки внутренней поверхности гильзы гидроцилиндра, а также метод обработки цилиндра гидравлических подъемников, обеспечивающий равномерную работу в паре трения гильзы и поршня гидравлического цилиндра.

Положения, выносимые на защиту.

Обоснованные оптимальные конструктивно-технологические параметры, описывающие влияние технологических режимов комбинированной обработки S , V , t на изменение шероховатости Ra и наклепа поверхностного слоя гильзы гидроцилиндра T .

Разработанная конструкция комбинированной развертки для обработки внутренней поверхности гидроцилиндров, на которую получен инновационный патент на полезную модель (Приложение А) РК №7082 от 12.01.2022.

Разработанный алгоритм расчета элементов конструкции комбинированной развертки позволяет изготовить инструмент для заданных условий, в соответствии с параметрами точности детали.

Методика расчета сборного комбинированного инструмента для обработки отверстий.

Усовершенствованная технология изготовления гильзы гидроцилиндра сокращает количество технологических операций на три и уменьшает затрачиваемое технологическое время на 1,2%, количество используемого режущего инструмента сокращает до двух.

Практическая значимость работы заключается в следующем:

– применение новой технологии изготовления гильзы гидравлического цилиндра с применением комбинированного инструмента увеличивает ресурс работы гидравлического цилиндра на 12,3% за счет создания на поверхности металла гильзы упроченного слоя с 30 до 45 HRC микротвердости и уменьшением шероховатости до Ra 0,32 мкм;

– снижение себестоимости гильзы на 2,8%, повышение ресурса работы гидравлического цилиндра на 12,3% обеспечивается применением новой технологии изготовления цилиндра с обработкой резанием и методом поверхностной пластической деформации;

– разработана модель комбинированной развертки с использованием программы Компас3D, SolidWorks, Deform позволяет установить напряженно-деформированное состояние разработанного инструмента и выявить местные напряжения для корректировки полученных данных.

– разработан технологический процесс создания конструкции комбинированного инструмента для обработки отверстий в гидравлических цилиндрах с применением комбинированной развертки;

– результаты работы применяются в учебном процессе при подготовке обучающихся бакалавриата по ОП «Машиностроение» в Северо-Казахстанском университете им. М. Козыбаева;

– результаты работы используются в учебном процессе при подготовке учебных планов для обучающихся по специальности 6В07101 – «Машиностроение» в Северо-Казахстанском университете им. М. Козыбаева;

– по результатам диссертационных исследований, разработана конструкция комбинированной развертки для обработки внутренней поверхности гидроцилиндров, на которую получен инновационный патент на полезную модель РК №7082 от 12.01.2022 г.

Снижение себестоимости гильзы на 2,8%, повышение ресурса работы гидравлического цилиндра на 12,3% обеспечивается применением новой технологии изготовления цилиндра с обработкой резанием и методом поверхностной пластической деформации.

Результаты проведенной работы могут быть использованы в машиностроительном производстве, как в качестве пособий по написанию дипломных работ студентами образовательных организаций, так и для научно-исследовательских работ бакалавров и магистрантов по специальности «Машиностроение».

Апробация работы

Основные результаты диссертационного исследования доложены и обсуждены на:

– международной научно-практической конференции «Наука 2017: итоги, достижения, перспективы» (Ставрополь, 20.12.2017);

– международной научно-практической конференции «Козыбаевские чтения - 2017: Казахстан и современные вызовы времени» (Петропавловск, 2017);

– 13- международной научно-технической конференции «Современные методы и технологии создания и обработки материалов» (Минск, 2018);

– the 5th international conference on Green Design and Manufacture 2019 IConGDM 2019 (Bandung, 2019 – 29-30 April).

Публикации

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 10 печатных работах, в том числе 3 статья в изданиях, рекомендованных КОКСОН МНВО РК; 6 публикации в Международных конференциях, из них 3 – зарубежных; 1 статья в Scopus базе данных индексируемых журналов с процентилем 44. Получен инновационный патент на полезную модель РК №7082 от 12.01.2022 г.

Личный вклад автора

Основные результаты теоретических и экспериментальных исследований получены автором самостоятельно. В печатных работах, которые написаны в соавторстве, соискателю принадлежит ведущая роль при обобщении и анализе полученных результатов.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, четырех разделов и заключения, изложенных на 114 страницах, содержит 20 рисунков, 8 таблиц, 87 использованных источников и 5 приложений.

1 ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ПРИ ОБРАБОТКЕ ОТВЕРСТИЙ

1.1 Анализ особенностей окончательной обработки отверстий

Обработка внутренних цилиндрических поверхностей является наиболее сложным процессом, чем аналогичная обработка наружных поверхностей. Это связано с внутренней цилиндрической образующей поверхностью, что создает сложности при ориентации режущего лезвийного инструмента относительно обрабатываемой поверхности, при подаче СОЖ, измерениях и контроле микрогеометрии и размеров, наблюдении за процессом, использовании более сложного инструмента и прочих особенностях. Основные методы чистовой обработки резанием, которые наиболее широко используются в промышленности, не только имеют низкую производительность, но и технологически недостаточно совершенны и получают при использовании стандартных инструментов средние значения точности.

Несмотря на то, что они обеспечивают точность обработки на уровне технологических требований, формы и размеров отверстий, они не полностью обеспечивают соответствующие характеристики на уровне микрогеометрии. В результате, в технологическом процессе при обработке внутренних поверхностей после чистового растачивания возникает вопрос добавления операции доводки для обеспечения необходимого качества поверхностного слоя. Эти детали обычно изготавливаются из пластичных материалов, и более целесообразно достигать необходимого качества поверхности с помощью ППД.

При пластическом деформировании поверхностного слоя металла имеется ряд преимуществ, по сравнению с традиционной обработкой на станках: точение, шлифование, хонингование и полирование [20]:

- сохраняется целостность волокон металла с образованием мелкозернистой структуры на поверхностном слое;
- отсутствие шаржирования у обработанной поверхности частичками шлифовального круга и полировочных или притирочных паст;
- отсутствие на поверхности термических дефектов;
- достижение минимального параметра шероховатости поверхности (R_a , мкм) за один рабочий проход на оборудовании;
- создание благоприятных напряжений (сжимающих и остаточных) в поверхностном слое металла;
- повышение микротвердости поверхности более плавно без скачков.

Управление процессом чистовой обработки отверстий давлением значительно усложняется тем, что поверхностный слой материала заготовки предельно неоднородно деформирован в результате предшествующей ее обработки резанием, его микрогеометрия хаотична [21]. Изучение процесса поверхностного пластического деформирования осложняется следующими факторами.

Поскольку все технические металлы являются сложными сплавами, в которых содержатся растворимые и нерастворимые примеси химических веществ и характеризуются неоднородностью структуры, некоторые

исследователи отрицают установление определенных количественных закономерностей между внутренними напряжениями и деформациями в реальном неоднородном металле [22]. В результате математической и прикладной теории пластичности материалов пренебрегают реальным строением физико-химической неоднородностью металла с изменяющимися при процессе деформирования свойствами и рассматривают металл как однородное тело в пространстве. По итогу ограничиваются качественным изучением процессов обработки давлением, а прикладной теории пластичности (во многих, если не в большинстве случаев) получают численные зависимости, которые недостаточно точны для практического использования. Это положение усугубляется особенно большой исходной неоднородностью при поверхностных слоях металла, деформируемого при чистовой отделочно-упрочняющей обработке. Необходимо признать, что неизбежные в подавляющем большинстве случаев обработки давлением экспериментальные исследования и отладки процессов финишной обработки в сравнении с формообразующей обработкой требует меньших затрат времени и средств.

Проблема изучения процессов ППД обусловлена тем, что при заданных механических свойствах металла, величина сопротивления пластическому деформированию постоянно меняется вместе с изменением механических свойств [23]; определено, что эти изменения по характеру неоднородны.

При расчетах числовых значений режимов обработки металлов давлением, обязательно необходимо предварительно экспериментально на компьютерной модели устанавливать характерную для данного металла зависимость, которая связывает сопротивление пластическому деформированию с величиной деформации.

Таким образом, задача создания прикладной теории пластичности должна решаться комплексно, то есть путем установления качественных зависимостей и количественных закономерностей между напряжениями и деформациями в реальном металле на основании результатов теоретических и экспериментальных исследований, а также обобщения данных накапливающегося производственного опыта.

1.2 Классификация методов обработки и инструментов для окончательной обработки отверстий

Одним из направлений совершенствования чистовой обработки отверстий является переход от резания к обработке давлением. Область эффективного применения финишной обработки поверхностным пластическим деформированием в настоящее время достаточно широка и непрерывно расширяется. Причиной этого являются:

- непрерывно повышающиеся требования к эксплуатационным свойствам поверхностей деталей машин;
- создание новых схем, способов и инструментов для холодной обработки давлением.

В настоящий момент стала возможной обработка давлением не только материалов высокой твердости, но и таких как органическое стекло и

различные пластмассы [24]. Считавшиеся до некоторого времени предельными значения временного сопротивления $(150-170) \cdot 10^7$ Па и твердости 38-42 HRC, выше которых обработка металлов давлением в холодном состоянии не рекомендовалась, оказались заниженными. Усложнение кинематики процессов обработки давлением и в частности способа вибронакатывания обеспечило возможность создавать поверхности с регулируемым микрорельефом, обладающие новыми и ранее не достижимыми эксплуатационными свойствами.

Классификация способов обработки ППД может быть, по назначению: выглаживающие, калибрующие, упрочняющие; по принципу работы: статические ударные.

После получения отверстия, в большинстве случаев происходит его рассверливание большим сверлом для увеличения диаметра до нужного размера. Просверлить отверстие нужного большого размера на практике применяется редко, так как отверстия больших диаметров плохо поддаются сверлению, в результате при изготовлении отверстия сверлом большого диаметра происходит большой износ режущей части инструмента, большие нагрузки на оборудование и высокая потеря времени. При рассверливании сверло большего диаметра выбирается после получения отверстия меньшего размера, в итоге достигается отверстие необходимого размера с заданными параметрами точности. Но на этом процесс изготовления гладкого цилиндрического отверстия практически не заканчивается, и в дальнейшем требует дополнительной механической обработки для выполнения условия цилиндричности детали.

Зенкерование – это способ обработки отверстий, которые получили в результате операции сверления, для придания более точной цилиндрической формы, увеличения качества точности и высокого качества внутренней поверхности. Зенкерование обычно выполняется специальным инструментом на стандартном оборудовании, называемом зенкер. Зенкеры бывают изготовлены в различных исполнениях, как с режущими цилиндрическими или коническими кромками на поверхности, и будут называться цилиндрические и конические, и с режущими кромками, которые могут быть расположены на торцевой поверхности, и будут называться торцевые насадные, цельный зенкер. Широкое распространение получили цилиндрические зенкеры. Зенкерование в зависимости от отверстия может быть процессом окончательной обработки или подготовительным к следующей операции технологического процесса хонингованию или развертыванию. Для следующей технологической операции развертывание, необходимо при зенкеровании оставляется припуск на дальнейшую механическую обработку резанием.

Развертывание – это чистовая технологическая операция для обработки отверстий. По сущности похожа на зенкерование. Данная обработка рассчитана на получение заданных техническими условиями размеров отверстий с последующей возможностью изменения и коррекции округлости и цилиндричности формы. Однако, зенкером обрабатывают отверстие для последующего применения крепёжных заклепок или болтов, а развертывание позволяет получить более точные откалиброванные цилиндрические

внутренние поверхности валов, подшипников и др. Развертывание отверстий позволяет в большой степени уменьшить трение в обрабатываемой зоне и обеспечить довольно высокую плотность в зоне контакта между сопрягаемыми элементами. Данные задачи решаются в результате уменьшения величины шероховатости рабочих поверхностей для вала и для отверстия [25].

Для создания отверстия обработанного начисто применяется следующая последовательность технологических операций: сверление, зенкерование и завершающая операция развертывание. Сверление позволяет создать технологическое отверстие, а рассверливание для получения отверстия необходимого заданного диаметра; операция зенкерование для первичной чистовой обработки полученного отверстия; завершением механической обработки будет являться развертывание. После чего полученное технологическое отверстие полностью готово для применения по служебному назначению для сборки, клепки и т.д.

Таблица 1.1 – Характеристики способов финишной обработки отверстий методами ППД

	Принципиальная схема	Достижимая шероховатость, $R_{a \max}$	Глубина наклепа, мкм	Степень наклепа, %
Раскатывание		0,08-0,32	До 15000	20-50
Выглаживание		0,08-0,04	1000	20-25
Дорнование		0,32-0,16	5000	20-50
Ударное раскатывание		0,32-0,08	5000	20-50
Вибрационная обработка		0,32-0,08	2000	20-40

В соответствии с таблицей 1.1, для обработки отверстий гидроцилиндров способы:

Раскатывание – используется качение инструмента по рабочей поверхности:

Инструмент – раскатные ролики или шарики.

Выглаживание – используется скольжение инструмента по поверхности, локально контактирующей с инструментом:

Инструмент – твердый наконечник или шарик.

Дорнование (деформирующее протягивание) – используется поступательное выглаживающее скольжение инструмента по охватывающей его поверхности:

Инструмент – деформирующая протяжка (дорн).

Ударное раскатывание – используется удар роликов в момент прохождения выступающих частей опоры, удар обеспечивается вращением опоры.

Вибрационная обработка – используется накатывание или выглаживание при вибрации инструмента по касательной к поверхности деформируемого материала:

Инструмент – шар или выглаживающий наконечник.

При анализе характеристик способов финишной обработки отверстий методами ППД можно сделать вывод о средних значениях для режимов обработки цилиндрических отверстий.

1.3 Постановка задачи для обеспечения качества обработки отверстий гидроцилиндров

Актуальной проблемой в условиях предприятия является получение качества внутренней поверхности гидроцилиндров и ее оптимизация с целью обеспечения требуемых эксплуатационных свойств поверхностей деталей и машин и приборов в целом.

Взаимосвязь общих характеристик поверхностного слоя (шероховатость, точность) и эксплуатационными параметрами свойства деталей свидетельствует об оптимальной (с точки зрения повышения эксплуатационных свойств деталей) поверхности (рисунок 1.1): достаточно твердая, имеет сжимающие остаточные напряжения, мелкодисперсная структура, сглаженная форма микронеровностей поверхности [26].

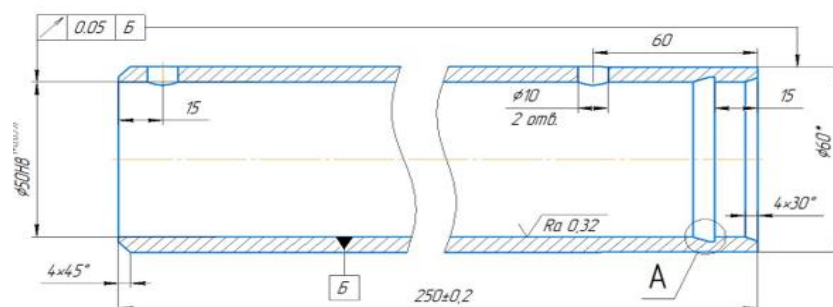


Рисунок 1.1 – Чертеж детали

Основное требование к внутренней поверхности гидроцилиндра – износостойкость. Износостойкость внутреннего отверстия гильзы будет зависеть от волнистости и шероховатости, точнее от высоты гребешков неровностей, от фактической площади поверхности контакта, от шага и формы отдельных неровностей, а также и от микротвердости поверхностного слоя [20, с. 63-67]. Тонкие и многочисленные неровности обеспечивают большую износоустойчивость, чем крупные неровности большого шага. Направление рисков обработки, по экспериментальным данным проф. П.Е. Дьяченко (Разработка инструмента с некруговой рабочей поверхностью для повышения эксплуатационных характеристик прокатных валков при их шлифовании/ диссертации Козлов А.М., 2005) показывают, что при жидкостном трении и малой высоте неровностей значения не имеет (т.е. нет преимущества протягивания). Оптимальная высота шероховатости, для обеспечения точности сопряжения, может быть определена по следующим рекомендациям [27]:

$$Ra = (0.1 \div 0.15) T_D$$

– для диаметров сопряжения более 50 мм.

$$Ra = (0.15 \div 0.2) T_D$$

– для диаметров сопряжения от 18 до 50 мм.

$$Ra = (0.2 \div 0.25) T_D$$

– для диаметров сопряжения меньше 18 мм.

Для обработки гильз гидроцилиндров диапазон обрабатываемых размеров находится в пределах от 30 до 80 мм (таблица 1.2). Требуемая точность обработки - 8 квалитет. Необходимая шероховатость внутренней поверхности деталей составляет $R_a=0,63$ мкм, что соответствует 7 классу шероховатости поверхности по ГОСТ 2789 (Приложение Б).

Таблица 1.2 – Размеры детали и заготовки

Изделие	Обозначение	Размеры		Заготовка труба ГОСТ 8731 ГОСТ 8732	Материал, сталь	Программа выпуска
		диаметр	длина			
с/х	Гильза ГЦ 240. 10.002	30	280	48x10	35	400
с/х	Гильза ГЦ 260. 20.001	40	388	57x12	35	400
с/х	Гильза ГЦ 288. 30.002	40	402	57x12	35	500
ж/д	ЖД 12М.10.001	50	215	68x12	35	500
ж/д	РГ 23.20.102	50	166	68x12	35	500
с/х	Гильза ГЦ 285. 10.101	63	353	83x12	35	200
с/х	ЦП 6-80. 15.002	80	275	102x14	35	200

При финишной обработке отверстий гидроцилиндров основной интерес, как в теоретическом, так и в практическом отношении имеет явление упрочнения поверхности, сопровождающееся холодной пластической деформацией. В нашем случае оптимальной является поверхность имеющая

остаточные напряжения в пределах 200-350 МПа и повышение микротвердости не меньше 15%.

Исследования проф. П.И. Ящерицина [28] показали влияние шероховатости поверхности заготовки на эксплуатационные свойства детали. Максимальная износостойкость присуща образцам, имеющим качественную предварительную обработку, при этом имеет место, так называемая, технологическая наследственность, т.е. изменение эксплуатационных свойств деталей под влиянием технологии их изготовления.

Технологическая наследственность проявляется не только во влиянии метода и режима обработки, применяемых на последних чистовых операциях, но также может проявляться в изменении свойств или потере точности формы готовой детали при ее эксплуатации в результате воздействия тех или иных элементов качества поверхности, созданных в поверхностном слое детали при черновой обработке.

Для применения эффекта технологической наследственности необходимо определить связи между эксплуатационными характеристиками как отдельных деталей, так и изделий и режимами поверхностной обработки резанием детали на основных технологических операциях при её изготовлении. По результатам необходимо установить математическую зависимость: «натяг инструментальной обработки – качество поверхности», «качество поверхности – функция величины твердости поверхности» решение позволит установить прямую связь: «характеристика поверхностного слоя – режимы обработки».

Закономерности процесса поверхностно-пластического деформирования отражены во многих исследованиях. Особый 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., Проскураков 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. Данные авторы в той или иной мере отразили методы обработки и способы деформации поверхности различными инструментами, с применением НДС.

1.4 Анализ способов обеспечения эксплуатационных свойств

Как указывалось, ранее, более приемлемой для обеспечения необходимых эксплуатационных характеристик изделия или устройства является обработка рабочих поверхностей поверхностным пластическим деформированием. Определены несколько способов обработки отверстий: вибрационная

обработка, ударное раскатывание, протягивание (дорнование), выглаживание и раскатывание:

1. Вибрационная обработка не может быть применена для данных условий из-за неразмерности способа, т.е. невозможности обеспечения требуемой точности – необходима точная предварительная обработка резанием.

2. Ударное раскатывание имеет ограничение по минимальному размеру диаметра отверстия, предельный размер составляет 70 мм. Кроме того, присутствует тот же недостаток – неразмерность способа.

3. Использование дорнования невозможно из-за большой длины деталей. Деформирующая протяжка – сложный и трудоемкий в изготовлении инструмент, используется на специальных станках. Протягивание является эффективным и производительным способом финишной обработки, но только не для небольших программ выпуска изделий.

4. Раскатывание и выглаживание различаются по характеру работы и воздействию на обрабатываемую поверхность. Контактное обкатывание инструмента с заготовкой в первом случае происходит с трением качения, во втором случае с трением скольжения. Эффективность практически по всем технико-экономическим показателям при трении качения выше. Однако для нашего случая процесс раскатывания не дает обеспечения эксплуатационных характеристик.

Учитывая конкретные условия обработки, программу выпуска и требования, предъявляемые к деталям или изделиям, можно сказать, что приемлемыми являются следующие операции: раскатывание и выглаживание (таблица 1.3).

Таблица 1.3 – Износ гильз гидроцилиндров при различных методах ее обработки

Вид обработки	Шероховатость, мкм	Наклеп, %	Износ гильзы	
			мг	%
Хонингование	0,63	180	440	74
Доводка	0,2 - 0,32	160	530	98
Раскатывание	0,32	210	420	78
Выглаживание	0,32	230	390	72

Таким образом, при изготовлении деталей из стали, наилучшими, с точки зрения износостойкости деталей гидроаппаратуры, методами обработки, в данных условиях, оказались методы, создающие наибольшее упрочнение металла поверхностного слоя. Шероховатость поверхности в данном случае имеет меньшее значение, чем наклеп металла поверхностного слоя. Однако следует отметить, что в тех случаях, когда степень наклепа металла поверхностного слоя при разных видах обработки оказывается близкой, а шероховатость поверхности отличается значительно, меньший износ дают виды обработки, создающие менее шероховатые поверхности.

Из приведенных примеров описания методов обработки кажется неожиданным большой износ обкатанных деталей. Микроскопическое исследование позволило обнаружить на их поверхности трещины,

возникающие с перенаклепом металла поверхностного слоя. Высокая износостойкость деталей, обработанных выглаживанием, объясняется наличием отрицательных остаточных напряжений [29].

Для деталей гидроаппаратуры, имеющих большую длину, немаловажное значение имеет точность обработки вдоль всего отверстия. Изменение размера при выглаживании и раскатывании при прочих равных условиях зависит от исходной шероховатости и приближенно определяется по формуле (1) [30]:

$$\Delta d \approx 2/3(Ra_{исх.} - Ra) \quad (1.1)$$

где $Ra_{исх.}$ и Ra – соответственно высоты неровностей до и после обработки.

Эта формула обеспечивает вполне приемлемую точность при условии, что исходная шероховатость не превышает высоты неровностей соответственно не выше $Ra = 0.63$.

Исследования, результаты которых приведены в книге В.М. Торбило [31], подтверждают данные о том, что выглаживание и раскатывание при упругом контакте заготовок и инструмента практически не изменяет точность исходной формы заготовки, так же, как и точность размеров. А это означает, что такая характеристика, как волнистость остается неисправленной и значительно снижает износостойкость гильз. Для исправления формы закрепление инструмента должно быть жестким.

Высокая жесткость системы инструмент – заготовка в радиальном сечении при работе инструментами ППД и, как следствие, высокая чувствительность этой системы к самым незначительным колебаниям основного параметра обработки – натяга. Это приводит к образованию участков с различным качеством поверхности, например «пятнистости» или выкрашиванию поверхности. Неоднородность материала неизбежна в промышленных условиях, для исключения колебаний натяга при встрече с твердыми или мягкими включениями, предварительная обработка должна исключить большое различие в высоте гребешков неровностей и исправить дефекты макрогеометрии.

Повышенные требования к предварительно полученному отверстию – основной недостаток методов поверхностного пластического деформирования. Исключить этот недостаток можно при совмещении операций предварительной обработки резанием с последующей калибрующей-отделочно-упрочняющей обработкой давлением.

Исследования и промышленные испытания показали, что в большинстве случаев выполнение условий, обеспечивающих повышение точности при одновременной обработке резанием и давлением, на практике не вызывает трудностей. Достоинство способа комбинированной обработки особенно наглядно иллюстрируется опытом совмещения получистовой и чистовой обработки стальных ступенчатых штоков на заводах с совместной работой научно-технических отделов и конструкторских бюро. Убедительно подтвердился этот результат работами, выполненными в последние годы в НИИ тракторосельмаш [32]. Эти исследования показали, что:

– совмещенная обработка точением и обкатыванием дифференциальными обкатниками с коническими роликами успешно применяется взамен конечной операции шлифования при обработке сталей, чугунов, цветных металлов и сплавов твердостью до 45 HRC₃;

- снижение высоты исходных неровностей происходит с 10 до 0,63 мкм;
- повышение поверхностной твердости составляет до 50%;
- происходит образование и стабилизация благоприятных для большинства условий эксплуатации сжимающих остаточных напряжений;
- производительность совмещенной обработки резанием и давлением в два- семь раз выше абразивной, а по трудоемкости ниже шлифования.

Совмещение нескольких видов механической обработки деталей возможно при обработке резанием и холодным пластическим деформированием с применением комбинированных инструментов. Особенности и достоинства таких предложений направлены на совершенствование металлообработки для сокращения цикла обработки и увеличения производительности труда, а так же повышения качества обрабатываемых деталей.

1.5 Современные направления исследований по вопросам повышения качества поверхностного слоя

Финишная обработка, основанная не на резании, а на холодной деформации получила высокое признание в 50-60 гг. прошлого столетия.

Вопросы пластического деформирования исследовались и изучались, начиная со времен Галилея. Надо отметить, что направление этих исследований вошло в промышленность как, в первую очередь, изготовление заготовок, далее раздел – формообразование и третье направление - отделочно-упрочняющая обработка. А профессором Султановым Т.А. создано целое направление науки – кинето-пластического формообразования.

При решении вопросов обработки давлением используется инженерная теория пластичности Уинксова Е.П., теория обработки металлов Губкина С.И. Фундаментальные исследования проведены по изучению трения, созданы теории трения (Б.Б. Дерягин, И.В. Крагельский и др.) и много способов определения коэффициента трения.

Из современных знаний и теорий в разделах механической обработки и объемной деформации, объясняющих природу пластической деформации и объемного упрочнения металлов и сплавов, признанной и более полной в считается дислокационная теория. В описании дислокационных теорий анализируется и рассматривается кристалл, исходное состояние которого содержит максимальное количество дислокаций, которые расположены в заданном виде, как пространственная сетка. Существование сеток обнаруживается под электронным микроскопом, а также рентгеновскими методами исследования. ППД представляется процессом образования новых пространственных дислокаций и перемещение по кристаллу.

Для решения задач поверхностной пластической деформации допускается применение законов наименьшего сопротивления, закон постоянства объемов, закон наименьшего периметра и др.

Большой вклад в разработку данной темы и научных основ при обработке деталей ППД внесли: Рыжов Э.В., Торбило В.М., Розенберг А.М., Шнейдер Ю.Г., и др., а так же зарубежные авторы Gazan G.A., Johnson W., Одинцов Л.Г., Папшев Д.Д., Барац Я.И., Проскуряков Ю.Г., Розенберг О.А., Султанов Т.А., Кудрявцев М.В., Kleemola H.I. и др. именно на этих трудах базируются многие научные труды при анализе и разработке многих инструментов для расчета обрабатываемых инструментов и анализе поверхностей при деформации.

В работах Розенберга А.М. и Розенберга О.А. процесс резания в вопросах механики рассмотрен как процесс холодного пластического деформирования. Обсуждены вопросы эквивалентности деформаций, возможность существования единой кривой течения металлов при резании и других элементарных процессах деформирования. Введена единая фундаментальная механическая характеристика обрабатываемого материала, создана теория, которая нашла широкое практическое применение в промышленности при проектировании процесса режущо-деформирующего протягивания.

Хронологическая систематизация исследований показала, что основным из направлений в настоящее время является развитие формообразования пластическим деформированием, а в области комбинирования методов обработки исследования в основном ведутся на процессах деформирующего протягивания и редуцирования.

Имеется большое количество патентов на комбинированный инструмент, сочетающий в своей конструкции режущую головку и деформирующий элемент в виде шариковой или роликовой раскатки. Ряд авторских свидетельств на данный тип инструментов, зарегистрирован в 80-е годы.

В последнее время были выполнены новые теоретические и экспериментальные исследования, целью которых было уточнение механизма холодной пластической деформации, расширение возможностей способов поверхностного пластического деформирования, улучшения управления этими процессами с тем, чтобы повысить обеспечиваемое ими качество поверхности и требуемые эксплуатационные свойства деталей машин и приборов, сделать их более экономичными и надежными.

В частности, к таким наиболее поздним работам относятся исследования В.М. Смелянского, М.М. Жасимова, Ю.Г. Шнейдера и др.

Заслуживает внимания работа Жасимова М.М., в которой приведен достаточно полный обзор работ в области изучения механизма и законов распределения контактных давлений, деформаций и напряжений при ППД и сделан вывод о том, что именно эти факторы определяют изменения качества поверхности обрабатываемых способами ППД деталей и практически все его характеристики. В соответствии с этим автор ставит задачу установления законов распределения контактных давлений, деформаций и напряжений, исходя из известного положения о невозможности установления этих законов

для способов обработки ППД, используя теорию упругости и пластического течения, автор предлагает методику определения законов распределения, на основе которой сложно составить соответствующий алгоритм.

Как утверждает автор, экспериментальная проверка подтвердила тот факт, что при ППД обрабатываемый материал нельзя считать ни абсолютно упругим, ни предельно пластичным, поэтому соответственно нельзя вести распределения контактных давлений, деформаций и напряжений по теориям упругости и пластического течения.

В подавляющем большинстве случаев в промышленной практике производится экспериментальная отработка оптимальных значений режимов ППД: в первую очередь усилия деформирования на основе планирования одно или многофакторного эксперимента. Результаты таких исследований приводят к частным, однако наиболее достоверным и надежным результатам, обеспечивающим достижения требуемых различных эксплуатационных свойств деталей.

На качественные показатели результатов и полученные результаты числовых величин для параметров и характеристики значения микрогеометрии поверхности материала, наибольшее влияние, как показал эксперимент, оказывает пиковое максимальное значение величин нормальных, а так же касательных напряжений при обработке, которые возникают в очаге деформаций, и отношение значений данных величин, что в свою очередь является определяющим для направление вектора деформации и перемещения материала металла в зоне контакта деформирующего шарикового элемента с обрабатываемой цилиндрической поверхностью. В результате, по мнению многих исследователей, данная задача подводится к решению значений величин и основных направлений определяющих напряжений в материале, рассматриваемом в пластичности материала и теории упругости для металлов. Данная задача решалась в компьютерном приложении Deform к упругому и пластическому деформированию неровностей поверхности на микроуровне технических поверхностей, которые могут быть обработаны различными инструментами для ППД для чистовой обработки, в настоящее время полностью не решена.

Имеется большое количество работ по раздаче осесимметричных заготовок, в которых изучались вопросы силовых нагрузок. Однако в них законченные решения имеют лишь вопросы раздачи бесконечных труб равномерно распределенным внутренним давлением, причем с использованием ряда допущений (плоское нагруженное состояние, отсутствие осевой нагрузки, идеально пластичный материал). Однако процесс деформирования при раздаче осесимметричной заготовки достаточно трудоемок. В узкой зоне контакта деформирующего элемента с заготовкой, перемещающегося в процессе деформирования по длине заготовки, возникают контактные давления, которые в зависимости от условий деформирования могут увеличиваться на два порядка и во многих случаях достигать нескольких гигапаскалей. Возникающее при этом трение вызывает образование на обработанной поверхности, существенного по толщине, слоя текстуры, степень деформации в котором

может достигать многих десятков и даже сотен процентов. В результате чего распределение степени деформации, упрочнения и напряжения по толщине стенки детали оказывается сложным, неравномерным, не допускающим (в силу значительности неравномерности) усреднения, не поддающимся теоретическому описанию.

Зона контакта деформирующего элемента дополняется зонами внеконтактной деформации изделия. Деформация во внеконтактных зонах носит упругопластический характер. Деформация в контактной зоне сопровождается адгезионными явлениями, которые могут изменяться от незначительных (при применении твердой смазки) до интенсивных, приводящих к схватыванию поверхностей изделия и инструмента. Изменения адгезионных явлений и контактных давлений влияют на процесс и коэффициенты трения, предопределяя значительные их изменения в зависимости от параметров процесса деформирования. Существующие модели процесса создания сложных инструментов для обработки металлов (на рисунке 1.2 приведен пример) заключается в сложности процесса, как результат - отсутствии математической модели процесса, которая может представлять возможность с достаточной точностью рассчитать все характеристики: силы, контактные давления, деформации, напряжения и т.д. Что в свою очередь, покажет недостаточную степень проведенного исследования и актуальности данной диссертационной работы.

Несмотря на все позитивные особенности микрогеометрии поверхностей, обработанных традиционными способами поверхностного пластического деформирования, она не совершенна и не удовлетворяет современным требованиям создания качественной поверхностей, обеспечивающей необходимые эксплуатационные свойства.

Таким образом, результатом проведенной работы будет являться совмещенная комбинированная обработка резанием и ППД, которая будет представлять все больший интерес в металлообработке. В первую очередь в автоматических циклах обработки деталей машин и механизмов, устройств и аппаратов различных отраслей деятельности.

Основные преимущества комбинированной обработки:

- использование стандартного оборудования;
- простота настройки инструмента;
- сокращение технологических операций;
- улучшение качества поверхностного слоя;
- повышение износостойкости (уплотнение, упрочнение) обрабатываемой поверхности.

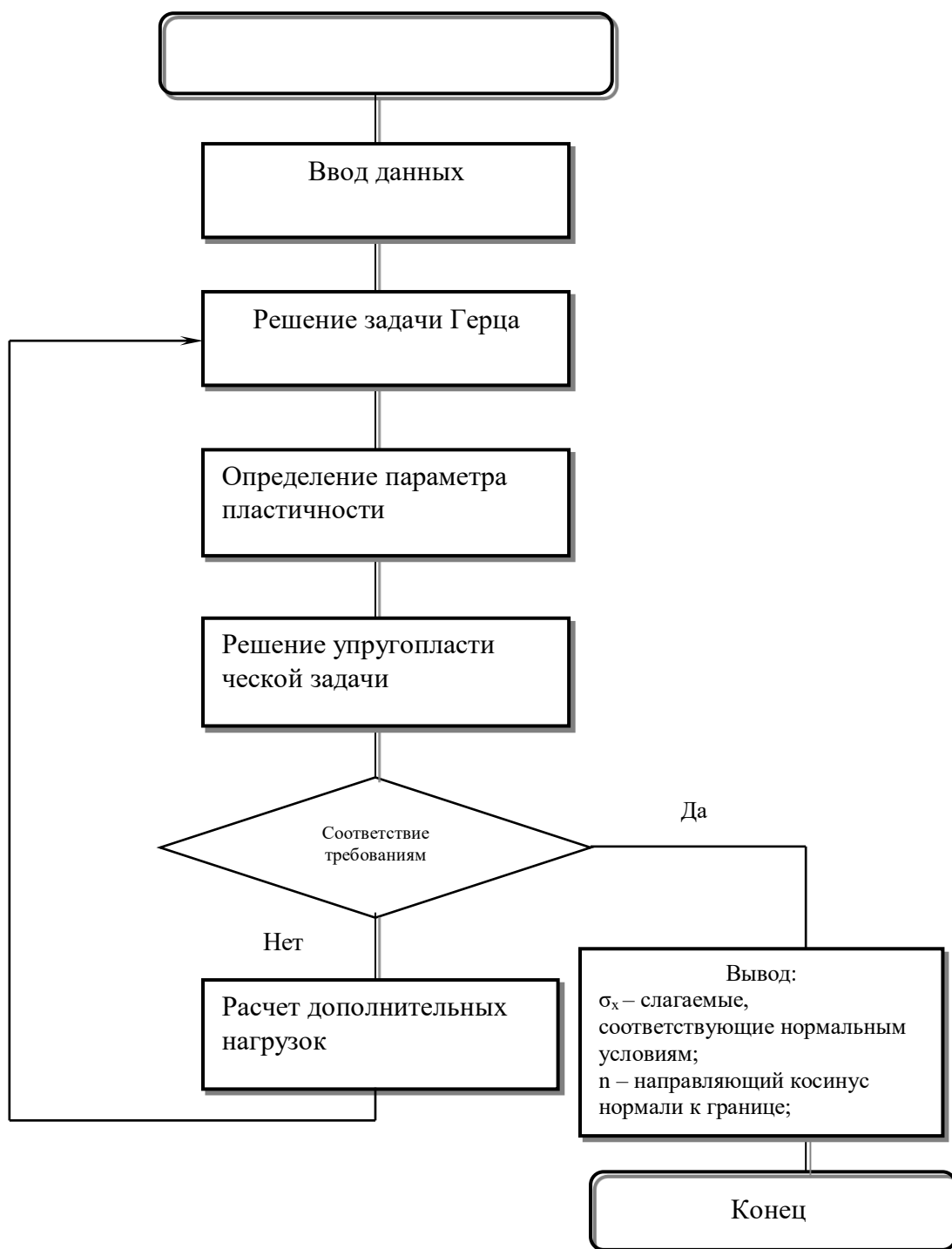


Рисунок 1.2 – Образец схемы программы расчета распределения контактных давлений, деформаций и напряжений

В результате, поставленная задача по совершенствованию технологического процесса комбинированной обработки сквозных отверстий при помощи совмещенной развертки, сочетающей в инструменте резание и пластическое деформирование шариками, является весьма актуальной. Преимуществом выбранной темы является изучение особенностей технологического процесса и влияние данного процесса на качество поверхности у получаемых деталей, а так же этапная разработка новых и совершенствование действующих конструкций металлорежущих инструментов.

Как результат — составление и обоснование общих рекомендаций по рациональной эксплуатации полученного инструмента.

Выводы по первому разделу

Установлено, что одним из перспективных направлений в металлообработке является применение на металлорежущих станках комбинированных инструментов с резанием и ППД, которые сочетают в себе несколько разноплановых инструментов и за один рабочий ход способны выполнять на заготовке лезвийную обработку резанием и упрочняющую ППД.

Анализ литературных большого количества источников показывает, что существующие инструменты по комбинированной обработке гладких цилиндрических отверстий представляют предложения без соответствующей последовательной научной и технологической проработки полученных данных.

Отсутствие математической модели, сложность описания процесса, которая в полной мере давала возможность с достаточной точностью рассчитать необходимые характеристики процессов при обработке – силы и деформации в металле и инструменте, контактные давления и пр. могут сказать о неполной степени проведенных исследований в данной области и об актуальности этой поставленной инженерно-научной задачи.

Поставленная в данной диссертационной работе цель, анализ текущего состояния имеющейся в металлообработке и эксплуатации элементов силового агрегата проблемы, определяют следующие задачи для исследований:

- выполнить анализ конструктивных особенностей и установить критерии качества гидравлических цилиндров, применяемых в машиностроении;

- исследовать технологический процесс обработки гильз гидроцилиндра для обоснования зависимостей, связывающих показатели получаемой поверхности с применяемыми режимами обработки комбинированным инструментом и конструктивными параметрами геометрических параметров инструмента;

- разработать компьютерную модель комбинированного инструмента и учесть оптимальные конструктивные параметры геометрии, а так же определить его предельно-допустимые деформации при анализе в программных продуктах для условия предварительно-напряженного состояния инструмента;

- усовершенствовать типовой технологический процесс гильзы гидравлического цилиндра с применением разработанного инструмента для деформационно-упрочняющего разработанного метода обработки гладкой внутренней поверхности гильзы.

2 ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА КОМБИНИРОВАННОЙ ОБРАБОТКИ ГЛАДКИХ ОТВЕРСТИЙ

2.1 Перспективность обработки комбинированным инструментом

Процессы резания и холодного пластического деформирования по внешним признакам и механизму воздействия на материал различны, в действительности они базируются на одних и тех же физических явлениях и законах, а так же, имеют ряд общих закономерностей. В этих процессах общая работа складывается из холодного пластического деформирования и трения. Контактные напряжения на рабочих поверхностях инструмента также одного и того же рода и порядка. Процессы образования текстуры в поверхностном слое идентичны и при резании, и при пластическом деформировании. Коэффициент трения между рабочей поверхностью инструмента и обрабатываемым металлом или материалом имеет одинаковые зависимости от контактных давлений.

Сочетание процесса резания и поверхностного пластического деформирования, как говорилось выше, дает преимущество комбинированной обработки, так как она является одним из перспективных направлений металлообработки [2, с. 82-86].

Основной теоретической базой для разработки комбинированного осевого инструмента могут быть работы Папшева Д.Д., Розенберга А.М., Одинцова Л.Г., Маргулиса Д.К., Проскуракова Ю.Г., Шнейдера Ю.Г.

В настоящее время нашли производственное применение деформирующие протяжки и сборные конструкции раскатных головок с режущим блоком.

Режуще-деформирующие протяжки (рисунок 2.1) широко используются в машиностроительном производстве для обработки точных отверстий с низкой шероховатостью поверхности и для сравнительно грубых операций исправления трубных заготовок перед дальнейшей обработкой. При этом могут осуществляться как малые поверхностные, так и большие пластические деформации, достигающие 20%, охватывающие всю толщину стенки детали, изменяющие ее размеры и механические характеристики металла.

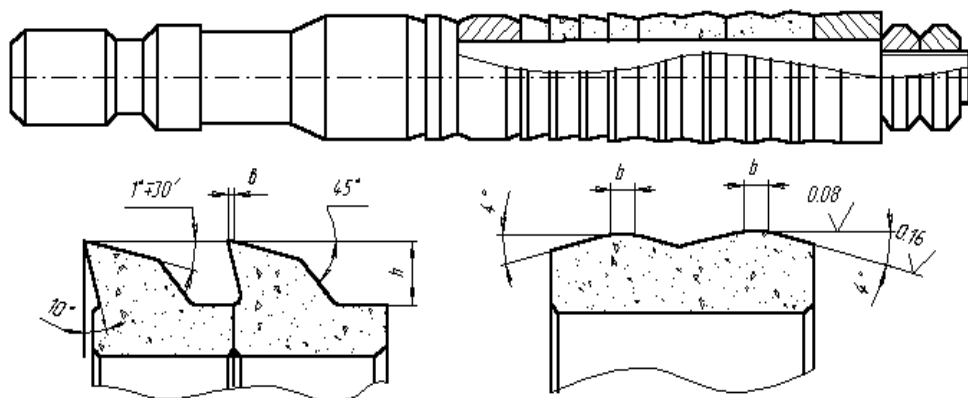


Рисунок 2.1 – Комбинированная режуще-деформирующая протяжка

В настоящий момент, когда большинство предприятий ориентированы на выпуск мелкосерийной и единичной продукции, использование производительных, но дорогостоящих, специальных протяжек не всегда является приемлемым и целесообразным. Более распространенной является часть станочного парка с кинематической схемой, включающей два элементарных движения: вращение и прямолинейное перемещение - подача. В этом случае, как правило, рекомендуется и используется сборная конструкция инструмента, включающая режущую часть и деформирующую.

Классическая комбинированная обработка - одновременное растачивание и раскатывание отверстий устройством, имеющим резовую 1 и раскатную 2 головки с расположенным между ними импеллером 3 для предотвращения попадания стружки под раскатные ролики (рисунок 2.2). При этом необходим обильный подвод СОЖ и обязательный выход стружки в сторону вектора скорости.

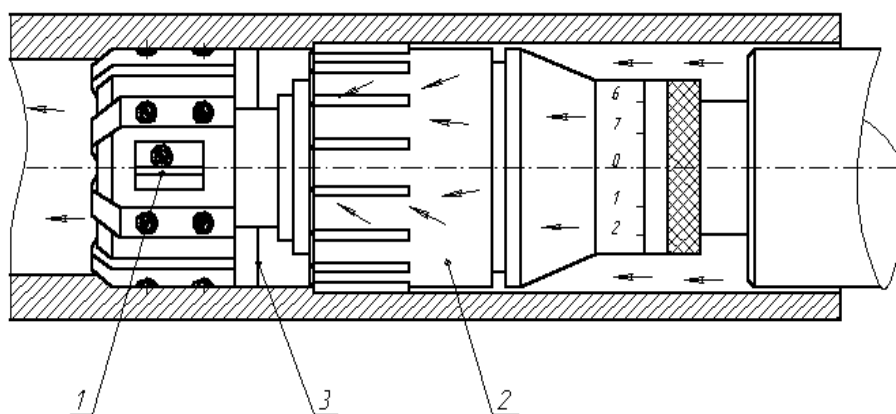


Рисунок 2.2 – Схема одновременного растачивания и раскатывания

Недостаток приведенной схемы в том, что для одновременного растачивания и раскатывания – обязательно необходимо исключение попадания стружки в раскатную часть инструмента и гарантированная подача СОЖ. Кроме того, необходимо предусматривать неравномерность износа разнородных частей инструмента.

Кроме того, раскатывание, как указывалось выше, не является удовлетворительным видом поверхностного пластического деформирования для деталей гидроаппаратуры, имеющих небольшие размеры отверстий и при этом значительную длину.

Способ выглаживания для нашего типа деталей гильз и внутренней поверхности цилиндров явился более целесообразным с точки зрения обеспечения эксплуатационных характеристик, поэтому сочетание резания будет более эффективным с использованием принципа выглаживания. И, адаптируясь к современным условиям промышленного производства при большой номенклатуре обрабатываемых изделий и частой смене позиций оптимальной кинематической схемой комбинированной обработки будет

являться классическая, включающая вращение и осевое перемещение инструмента. Традиционно чистовым режущим инструментом для лезвийной обработки отверстий является развертка. Комбинированный инструмент на основе развертки должен иметь деформирующий элемент, работающий по принципу выглаживания.

Комбинированная развертка представляет из себя следующие основные части: рабочая часть, хвостовик. Первая состоит из режущей (вставные твердосплавные пластины) и деформирующей части (закрепленные шарики). Режущие элементы оформлены в виде цилиндра, пластины, которые расположены на её режущей части развертки, закрепляют на острый конус (Приложение В). Цилиндрическая часть комбинированной развертки с уплотняющей ленточкой действует как деформирующий элемент на поверхностный слой уже обработанного отверстия.

Повышение качества обрабатываемого отверстия проектируемым комбинированным инструментом будет являться основной задачей, решение которой будет комплексно рассматриваться с постановкой ряда вопросов, определяющих теоретические исследования процесса ППД, выявление геометрических и конструктивных параметров комбинированного режуще-деформирующего разрабатываемого инструмента, с оптимизацией условий окончательной финишной комбинированной обработкой.

Для объединения операций/переходов при механической обработке гладких цилиндрических отверстий применяют различные комбинированные инструменты. Самыми распространенными из современных инструментов являются инструменты для обработки отверстий, например ступенчатые сверла, зенкеры и развертки. Инструменты указанные выше применяются на металлорежущих станках разных типов (токарных и токарных полуавтоматах, револьверных, сверлильных, агрегатных, обеспечивая достаточно высокую производительность и не сложное не дорогостоящее обслуживание.

Для совершенствования конструкции инструментов открывается большая возможность при применении и комбинировании различных способов обработки резанием, так как в результате появляется возможность применения при одной операции обработки использование множества преимуществ, которые свойственны отдельным технологическим процессам и инструментам. Примером данного металлорежущего инструмента может служить развертка с уплотняющими боковыми ленточками (рисунок 2.3).

Развертки могут быть разделяться по видам и типам на хвостовые и насадные, сборные, цельные, регулируемые и постоянного диаметра. Развертки относительно малого диаметра изготавливаются с цилиндрическим или коническим хвостовиком, который служит для ее закрепления на станке, либо в воротке с квадратным отверстием при работе вручную.

Насадные развертки насаживаются на специальные оправки, которые устанавливаются в шпиндель станка.

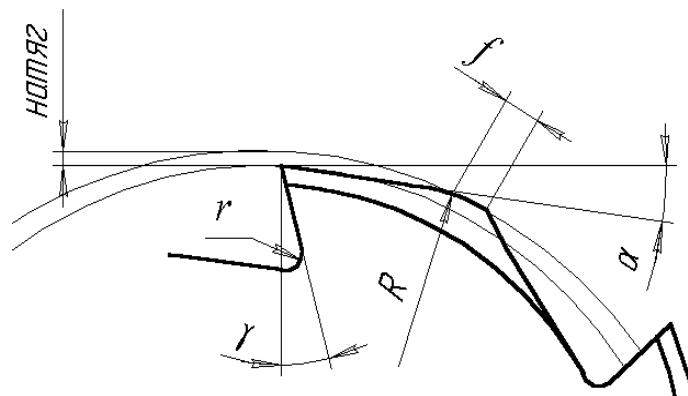


Рисунок 2.3 – Зуб с дополнительной уплотняющей ленточкой

Развертки цельные являются самыми простыми по своей конструкции, но в то же время не могут изменять обрабатываемый размер по диаметру. В результате большое применение получили сборные инструменты, т.е. сборные развертки с быстрорежущими или твердосплавными вставными режущими элементами, которые после износа можно выставить на заданный размер и это позволит увеличить срок службы. Данная возможность позволяет использовать один и тот же инструмент – составную развертку при обработке гладкого цилиндрического отверстия под необходимый диаметр.

2.2 Анализ основных параметров процесса обработки

Гильза считается самой трудоемкой при изготовлении детали для гидравлических цилиндров, от которой в большей мере зависит надежность и долговечность всего агрегата гидроцилиндра. Существующая типовая технология для механической обработки внутренней гладкой поверхности включает операции по обработке резанием: черновая (отрезка, расточка) чистовое точение и доводка. Последняя операция для отверстия может производиться различными способами шлифованием, хонингованием или раскаткой.

Изготовление гильзы гидроцилиндра методом обработки на токарном станке или расточки гладкой внутренней поверхности с дальнейшей шлифовкой, где качество обработанной поверхности получается ниже, чем при хонинговании, шлифовании или раскатке.

Для обработки внутренней поверхности гильзы применяют хонинговальные станки, которые обрабатывают цилиндрическую поверхность с помощью хонинговальной головки с вмонтированными в ее корпус абразивными брусками или с закрепленными наждачными шкурками. Если применяется обработка наждачными шкурками, то их последовательно меняют от крупнозернистой до мелкозернистой. При обработке, возникшая стружка спрессовывается, скатывается, склеивается и, оставляет на зеркале обрабатываемой поверхности задиры и царапины.

Одним из больших недостатков финишной обработки цилиндрической поверхности гильзы гидроцилиндра абразивными материалами является то, что абразивный инструмент оставляет на гладкой поверхности след от микрочастиц

абразивных зерен. В дальнейшем это может оказать негативное воздействие работу устройства в виде износа резиновых манжет и колец.

Определенно самым действующим и известным методом доводки внутренних гладких цилиндрических поверхностей является раскатка и раскатной инструмент.

При использовании раскатного инструмента используются пластические свойства материала металла, который под воздействием внешних нагрузочных или обрабатывающих сил может получить остаточную деформацию без самого поверхностного или внутреннего разрушения основного материала металла. Но, под действием сил при ППД поверхностный слой заметно уплотняется и повышается износостойкость, твердость.

Раскатной инструмент позволяет получать на поверхности сглаженные рельефы правильной геометрической формы (волновые или волнообразные с невысокой высотой) и исправлять высокие отклонения при чистовой механической обработке лезвийным инструментом, а так же избавиться от неровностей которые оставляет резец при растачивании.

Чистота поверхности после раскатки Ra 0,1...0,32 мкм.

Рекомендации для обработки внутренних поверхностей гладких гильз гидроцилиндров:

- 1) черновое точение;
- 2) чистовое точение, в том числе тонкое точение с припуском на заданный диаметр под расточку 0,04...0,06 мм;
- 3) раскатка или выглаживание.

После операции расточки, обработанная поверхность очищается (воздухом, смёткой) от стружки и смазывается специальным машинным маслом.

Операцию раскатки необходимо производить за один проход, и раскаточные части инструмента должны центрироваться по отверстиям.

Инструмент для раскатывания не требует специального оборудования или станков (Приложение Г) и поэтому могут быть применены на обычные токарные, сверлильные или расточные металлорежущие станки [33].

Лимитирующим процессом в комбинированной обработке является поверхностное пластическое деформирование. Обработка при ППД всегда сопровождается достаточно сложным процессом со структурными и фазовыми превращениями в материале [34]. На начальном этапе происходит дробление основного зерна металла на более мелкие с образованием мозаичной структуры. В результате увеличения развития сдвиговых деформаций далее по плоскостям смещения образуются новые измельченные структурные зерна. В результате они теряют основную форму, видоизменяются, вытягиваются, сплющиваются в сторону нагружения и деформирования. Изменяется соотношение сторон размеров образовавшихся кристаллов, создается правильно ориентированная и упорядоченная структура с волокнистыми элементами с анизотропными механическими свойствами материала, определяющими пластичность материала вдоль волокон которая становится выше, чем в поперечном направлении металла [35].

Главной, а возможно и одной из единственных причин упрочнения, при ППД является лавинное развитие внутренних дислокаций – дефектов в кристаллической решетке основного материала металла, которые накапливаются около линии сдвиговой деформации и дальнейшее закупоривание перед препятствиями, которые образуются в результате возникших деформаций. Измельчение на более мелкие блоки или кристаллы объемов металла, которые заключены между линиями сдвига, поворот или разворот этих уменьшенных элементов, искривление плоскости скольжения, а так же скопление продуктов разрушения основной кристаллической решетки позволяет увеличить неровности на всех направлениях плоскостей скольжения, аи как следствие упрочнение [36].

По итогу у поверхностного деформирования изменяется не только внутренняя микроструктура, но и физико-механические свойства поверхностного слоя основного металла: возникают остаточные сжимающие напряжения, увеличивается прочность и твердость поверхности. Шероховатость поверхности снижается [37].

Yen Y.C. [38] с соавторами разработана конечно-элементная 3D-модель в программном продукте «DEFORM» (рисунки 2.4, 2.5) 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 2.4 – Постановка задачи

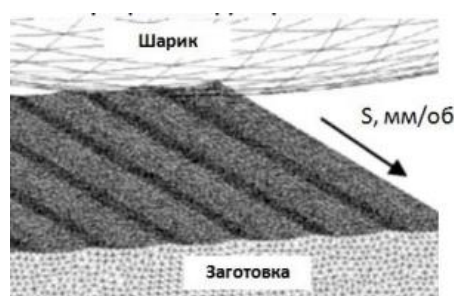
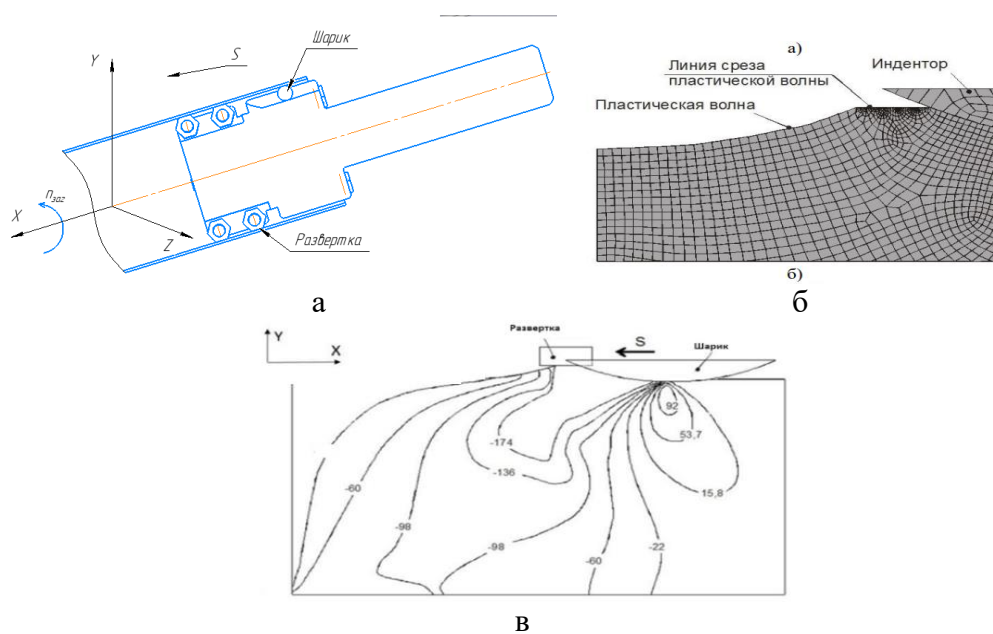


Рисунок 2.5 – Конечно-элементная модель ППД шариком

Как в 2D, так и в 3D-модели деформирующий инструмент (шарик) рассматривают как твердый объект, а заготовку – как упругопластический. Использование программы «DEFORM» позволяет разбить заготовку на мелкие

тетраэдр (8-12 элементов между пиками шероховатости). Шарик внедрялся в заготовку на заданную глубину 0,028 мм с определенным усилием 1150Н и перемещался с постоянной скоростью (100 м/мин). В результате автором установлено, что наибольшие сжимающие напряжения (от -180 до -500 МПа) локализованы на небольшой глубине (0,2-0,4 мм) заготовки. Также, автор предполагает, что 2D-модель позволяет прогнозировать остаточные напряжения лучше, чем 3D-модель, из-за снятия ограничений на фиксированное смещение узлов на заготовке [39]. 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 зёрненной структуры материала [40-44].

При решении задачи механики РСО разбиение производилось таким образом, что количество конечных элементов достигало более 15000.



а – модель процесса РСО; б – зона срезания пластической волны (фрагмент КЭ-модели); в – распределение компонент напряженного состояния, ζ_{xy} , Мпа

Рисунок 2.6 – Модель процесса размерного совмещенного обкатывания (РСО)

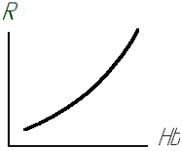
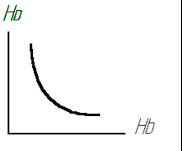
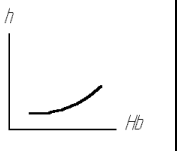
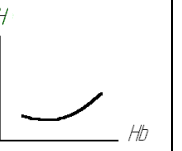
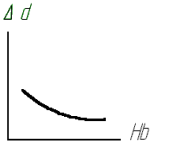
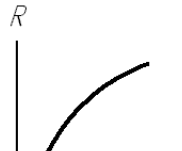
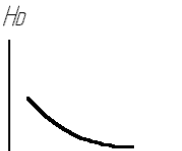



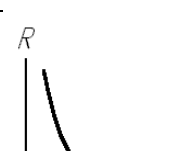

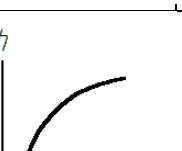

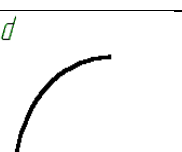
В соответствии с рисунком 2.6б, наибольшую концентрацию элементов модель может иметь непосредственно в зоне пластического течения металла в ОД, а также в зоне срезания пластической волны [45-47]. Результаты моделирования позволили определить напряженно-деформированное состояние, характеризуемое тензорами 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 (рисунок 2.6в) напряжения в районе задней контактной поверхности ролика. Величина градиента достигает -2200 МПа на 1 мм длины очага деформации [39, с. 3-65]. Таким образом, можно сказать, что процесс РСО позволяет интенсифицировать НДС в очаге деформации [48, 49].

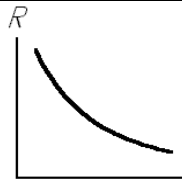
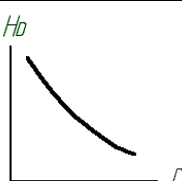
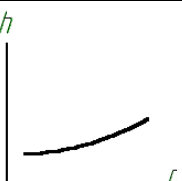
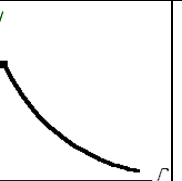
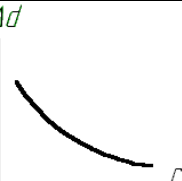

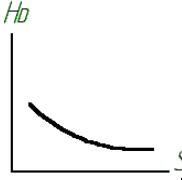

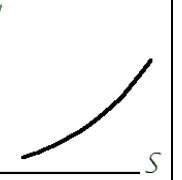
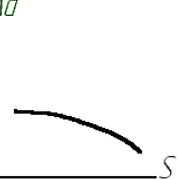
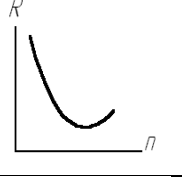
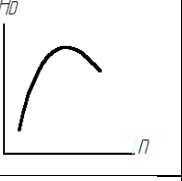
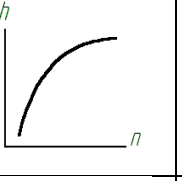
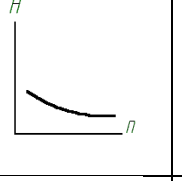
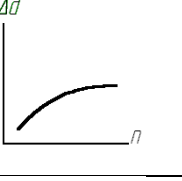
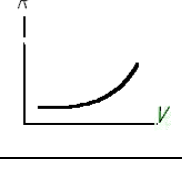
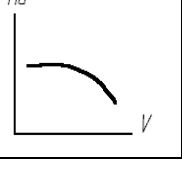
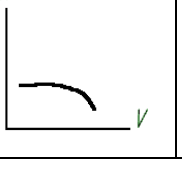
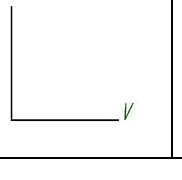
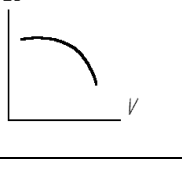
Блюменштейном В.Ю. и Махаловым М.С., с целью интенсификации НДС, разработана модель процесса ППД шариковым инструментом по схеме многократного нагружения-разгрузки металла детали (рисунок 2.6а), максимально учитывающей феноменологию процесса ППД, и получены распределения параметров напряженно-деформированного состояния, а также параметры механического состояния поверхностного слоя и остаточные напряжения применительно к стали 45 (ГОСТ 1050-88, таблица 1.2) [40, с. 20].

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 [50-54]. В таблице 2.1 приведены качественные зависимости между параметрами режима и результатами обработки

Таблица 2.1 – Качественные зависимости параметров режима и результата обработки

Условия обработки	Показатели обработки				
	шероховатость после обработки R_a , мкм	степень наклепа H_b , кг/мм ²	глубина наклепа h , мкм	волнистость H , мкм	изменение размера Δd , мкм
1	2	3	4	5	6
Исходная твердость материала H_c					
Исходная шероховатость поверхности R' , мкм					
Усилие обработки P , Н					

Продолжение таблицы 2.1

1	2	3	4	5	6
Радиус деформирующего элемента осевого сечения R , мм					
Подача S , мм/об					
Число проходов n					
Скорость обработки V в м/мин					

При верно заданных параметрах для обработки детали, она приобретает достаточно высокие эксплуатационные характеристики, но если параметры обработки были выбраны не верно, например, силы раскатки на инструменте или подача, это может вызвать разрушение поверхности – трещины или отслаивание. Величина необходимого упрочненного слоя должна определяться удельным давлением на площади контакта, а так же размерами [55]. Уровень высоты поверхностного слоя для поверхностного упрочнения зависит исключительно от создаваемого поверхностного давления при заданных режимах обработки, что подтверждается при проведенном анализе на малой глубине наклепа с увеличением твердости поверхности, которая была получена в результате обработки [56-58].

Главными параметрами обработки при процессе ППД являются:

1. Давление на пятне контакта P .
2. Продольная подача S .
3. Площадь контактируемой поверхности.
4. Скорость обработки V .
5. Величина составляющих сил, которые передаются от инструмента на контактную поверхность F .
6. Размеры тел деформирующих элементов на инструменте.

Продольная подача S , определяет получаемую шероховатость обрабатываемой поверхности в мкм, и равномерность распределения деформации при подаче в осевом направлении. Так же является определение

количества повторяющихся деформаций для каждого следующего участка поверхности, что непосредственно оказывает высокое влияние при упрочнении и определении остаточных напряжений. От заданных режимов скорости при обработке поверхности определяется протекание физического процесса деформации в данном очаге и наклеп [59]. Зависит и количество выделяемой теплоты Q .

Давление и контактная площадь, способствуют эффективному упрочнению поверхности и во многом подчиняются условиям прикладываемых сил, параметров обрабатывающего инструмента, механических свойств и состава материалов, а также от размеров обрабатываемой детали. Для остальных параметров механической обработки относят число рабочих ходов, вид и тип СОЖ [60-68].

Главным технологическим параметром для проведения и расчета комбинированного процесса является припуск для деформирования, который равен разнице между основным диаметром деформирующего элемента (d) и диаметром полученного отверстия ($d_0 =$ номинальному диаметру режущей части комбинированной развертки).

$$i = d - d_0 \quad (2.1)$$

В зависимости от величины натяга, комбинированные развертки по назначению могут быть [69-71]:

- 1) калибрующими (натяг равен начальным параметрам шероховатости R_a , в мкм);
- 2) выглаживающими (натяг меньше исходных параметров значения шероховатости R_a , мкм);
- 3) величина контактного давления может быть определена по определенной зависимости.
- 4) уплотняющими (натяг больше исходных значений шероховатости R_a , в мкм)

2.3 Исследование силовых зависимостей при комбинированной обработке

Исследование внешних сил, действующих при деформации, выделяет два типа: активные и реактивные. В некоторых случаях данные силы трения могут являться активными (при обкатке), а в других случаях – реактивными (при осаждении).

Активные силы, как правило, действуют касательно. При их воздействии на величину площади давления при возникновении сил деформация остается неизменной. Реактивные силы будут направлены перпендикулярно по отношению к обрабатываемой поверхности инструмента [72-76].

Процессы, возникающие в зоне деформации, определяются характером распределения, величиной нормальных и касательных нормальных. Однако из-за незначительных значений коэффициента трения основное влияние оказывает нормальное напряжение. Данная величина силы, обеспечивающая требуемые

напряжения в зоне происхождения деформации, зависит от величины этих значений и площади размеров контакта [77-81].

У продольной подачи равнодействующую действующих сил можно разложить на составляющие по координатным осям формула (2.2):

$$R = \sqrt{P_n^2 + P_t^2 + P_0^2} \quad (2.2)$$

где P_n – нормальная составляющая;

P_t – тангенциальная составляющая;

P_0 – осевая составляющая

Согласно этому, можно выделить следующие виды сил при деформации: нормальную, касательную (тангенциальную составляющую) и силу подачи (осевую составляющую). Основной силой, обеспечивающей необходимое давление в контакте между деформирующим инструментом и деталью, является нормальная составляющая P_n .

Осевая сила определяет нагрузку инструмента и мощность станка, нормальная составляющая совместно с шириной контакта определяет среднее удельное контактное давление. Кроме того, нормальная составляющая с тангенциальной определяют коэффициент трения f и угол трения η и являются физическими составляющими, определяющими остальные силы [82, 83].

Экспериментальные исследования силы, проводимое при обкатывании и выглаживании, изложенные во многих работах, и в частности, в работе Д.Д. Папшева, позволяют сказать, что при обработке касательная сила (P_t) по среднему значению во много раз меньше нормальной составляющей силы [84]. Изменение подачи не оказывает влияния на соотношении вышеобозначенных сил. При обработке более грубой поверхности касательная сила несколько возрастает. Значение осевой силы уменьшается от направления касательной силы [85-89].

По результатам полученных экспериментальных данных Папшевым Д.Д. сделан вывод: полученная равнодействующая сила F отличается от нормальной силы в пределах от 0,4 до 1,2%. Эти соотношения совпадают с аналитическими зависимостями, полученными в работе Шнейдера Ю.Г.

Величина касательных сил и сил подачи главным образом зависит от величины нормальной силы, скорости обработки, размеров обрабатываемого инструмента, наличия смазки и свойств обрабатываемого материала, т.е. от параметров, определяющих коэффициент трения. Особенно эта зависимость проявляется в условиях выглаживания, при трениях скольжения [90].

С увеличением скорости выглаживания коэффициент трения снижается более чем в 2 раза. Минимальные значения касательной силы и силы подачи наблюдается при выглаживании с применением СОЖ. Коэффициент трения понижается с повышением твердости и увеличением радиуса инструмента. В этом случае силы P_t и P_0 будут снижаться.

Величину нормальной силы рекомендуют определять по формуле (2.3) [91].

$$P_H = \pi \cdot q_N (R \sin \alpha)^2 \quad (2.3)$$

где q_N – среднее контактное давление;

R – радиус деформирующего инструмента;

α – угол вдавливания, зависящий от свойств материала, размеров детали и инструмента.

Нормальную силу при выглаживании можно также определить по формуле (2.4) В.М. Торбило [91, с. 41]:

$$P_B = \pi \varepsilon H V R^2 \quad (2.4)$$

где $\varepsilon = 0,0015-0,007$ – относительная глубина внедрения

HV – твердость по Виккерсу.

Однако величина деформации в формулах выражена различно и контактная площадь инструмента с деталью принято приближенно.

Более точное выражение для контактной площади имеет следующий вид:

$$F_k = \frac{8}{3} R \sqrt{\frac{Rd}{Rd \pm R}} \left[\sqrt{(h+w)w} + w + \frac{1}{4} \sqrt{wh} \right] \quad (2.5)$$

где R – радиус рабочей части инструмента:

Rd – радиус детали;

h – остаточная деформация;

w – местная упругая деформация детали и инструмента.

Величина h определяется экспериментально, а величина w рассчитывается по формулам полученным в разделе теории упругости материалов. Знак «плюс» в знаменателе первого подкоренного выражения в формуле (2.5) следует ставить при расчете контактной площади в случае обработки наружных цилиндрических поверхностей, а знак «минус» - при обработке отверстий.

Механическая операция ППД возможна при контактных рабочих напряжениях, которые вызывают пластическую деформацию материала (металла). При возникновении между деталью гильзы гидроцилиндра и комбинированного инструмента упругой связи обработка не будет производиться. При нормальном протекании процесса ППД рабочая часть инструмента внедрена на определенную глубину в обрабатываемую поверхность детали. При этом необходимо выдерживать условие (2.6):

$$\varepsilon_2 > \varepsilon > \varepsilon_1 \quad (2.6)$$

где $\varepsilon = h/R$ – относительная глубина внедрения;

ε_1 – относительная глубина внедрения, при которой рабочие напряжения вызывают пластическую деформацию;

ε_2 – относительная глубина внедрения, при которой прекращается пластическое течение и начинается разрушение поверхности детали.

Величина относительного внедрения ε должна быть выбрана между ε_1 и ε_2 в зависимости от требуемого упрочнения.

Нормальное протекание процесса правильнее выражать через среднее значение в контакте. По мере увеличения нормальной силы давления давление в контакте также растет. Однако это будет происходить до тех пор, пока не будет исчерпана способность металла к деформированию. При дальнейшем увеличении силы, начинает разрушаться поверхностный слой, при этом давление достигает своего критического значения.

Для комбинированной обработки основными показателями качественной обработки будет являться степень упрочнения и уменьшением исходной шероховатости.

Упрочнение и уменьшение текущей шероховатости в мкм, определяют заданной величиной усилия при котором раскатные элементы инструмента вдавливаются в обрабатываемую поверхность.

$$P_n = q_N \cdot F \quad (2.7)$$

где P_n – нормальная составляющая силы, Н;

F – площадь контакта, м²;

q_N – контактное давление, Мпа.

Теоретический анализ процесса зависимости контактного давления от технологических факторов для создания условий процесса может быть выполнен с применением основных законов теории упругости и пластичности материала металла. За основу взята безмоментная теория оболочек, согласно этой модели, величина контактного давления может быть вычислена на основе следующей формулы (2.8):

$$q_N = \frac{i}{\frac{2r}{E_2} \left(\frac{r_n^2 + r^2}{r_n^2 - r^2} + \mu_2 \right) + \frac{2r}{E_1} (1 - \mu_1)} \quad (2.8)$$

где i – натяг;

r – радиус обработки;

r_n – наружный радиус детали;

μ_1, μ_2 – коэффициенты Пуассона инструмента и детали;

E_1, E_2 – модули упругости материалов инструмента и детали.

В процессе расчета q_N с использованием зависимости (2.8) важно учитывать такие исходные параметры детали, как материал и толщина стенки, чтобы корректно определить величину натяга.

Чтобы гарантировать прочность инструмента, определить температуру в зоне контакта между инструментом и изделием, а также правильно организовать технологический процесс, необходимо принимать во внимание контактные давления.

2.4 Анализ упрочнения поверхностного слоя при обработке ППД

Результаты исследований и анализа литературных источников позволяют представить механизм поверхностного упрочнения следующим образом. При ППД происходит пластическая деформация поверхностного слоя гильзы гидроцилиндра. Во время деформации металла значительное влияние оказывают искажения (дефекты) кристаллической решетки. Долгое время идеальная решетка служила основой для теоретических расчетов механических свойств металла, но на практике реальная решетка всегда обладает различными дефектами, которые и являются причиной большого расхождения (в сотни раз) между значениями величин полученных в теории и реальными значениями сопротивлений сдвигу слоев сил в различных металлах [92-104].

Под действием напряжений от внешних сил в искажениях кристаллической решетки возникает пластическая деформация. При начальной деформации в микрообъемах пластическая деформация материала направляется по определенным установившимся кристаллографическим плоскостям и направлениям. Во внутренней структуре зерен происходит интенсивное движение дислокаций. С увеличением времени действия и деформирующих напряжений скорость образования дислокаций возрастает. Особенно это наблюдается в начальном периоде приложения нагрузки. Движущиеся дислокации, сталкиваясь с препятствиями (например, с дислокациями, расположенными в другой плоскости), блокируются, что приводит к их закреплению. В недеформированных отожженных углеродистых сталях средняя плотность дислокаций составляет примерно 10^6 - 10^8 см⁻². После поверхностного деформирования число дислокаций в наиболее деформированном слое увеличивается на несколько порядков (в стали 45 до $5,52 \cdot 10^{11}$ – $11,58 \cdot 10^{11}$ см⁻² [105]).

Аналогичная картина получена и для других углеродистых сталей. В закаленных сталях плотность дислокаций в деформированном слое достигает $(3,7 \div 9,6) 10^{12}$ см⁻², а в титановых сплавах $2,94 \cdot 10^{11}$ см⁻².

Пластическая деформация приводит, кроме того, к образованию точечных дефектов, плотность которых в наклепанном металле также увеличивается. Скопления точечных дефектов могут быть источниками новых дислокаций.

Исследования показали [104, с. 53], что в процессе пластической деформации кристаллы разламываются на фрагменты и блоки с выраженными искажениями кристаллической решетки на границах между ними. При высоких степенях наклепа размер блоков достигает $(2,1 \div 6,2) 10^{-6}$ см. Границы, где фрагменты и блоки создают барьер для сдвиговой деформации. Когда количество этих фрагментов и блоков увеличивается, увеличивается и число границ, которые задерживают дислокации. Если степень разориентировки между фрагментами и блоками увеличивается, это усиливает сопротивление границам пропусканию дислокаций, что в свою очередь увеличивает сопротивление деформации. Именно это является основной причиной упрочнения металлов в процессе пластической деформации. Вероятно, процесс дробления блоков с микроискажениями продолжается до определенного

предела, зависящего от химического состава и физико-химических свойств материала. Как только микроискажения достигают своего предельного значения, способность решетки к дальнейшей деформации исчерпывается. Если после этого давление продолжает расти, то дальнейшее дробление блоков может привести к образованию микротрещин и разрушению поверхности. Следует отметить, что направление сдвига не является постоянным в процессе деформации. По мнению Н.Ф. Лашко, в результате изгибания кристаллографических плоскостей сдвига происходит изменение и их направлений. При этом возникновение зон изгиба предшествует перемещениям по границам зерен.

Таким образом, для холодного пластического деформирования характерны сдвиговая деформация, блокообразование и изгибание кристаллографических плоскостей. Сдвиговая деформация происходит главным образом по внутрикристаллическим плоскостям скольжения. Объясняется это тем, что границы зерен вследствие неправильной формы и заклинивания соседних зерен при температурах, более низких, чем температура плавления, находятся в условиях менее благоприятных для сдвиговой деформации по сравнению с внутрикристаллическими плоскостями скольжения.

Результаты экспериментальных исследований в работах Папшева Д.Д., Шнейдера Ю.Г. и др., дают основание считать, что при поверхностном пластическом деформировании сталей наряду с измельчением блоков большую роль в эффекте упрочнения играет дисперсионное твердение, изменение плотности дислокаций и фазовые превращения. По мере повышения плотности дислокаций и увеличения дисперсности карбидов, блокирующих сдвиги по плоскостям скольжения, прирост твердости повышается. Аналогичная картина наблюдается и при увеличении количества остаточного аустенита, превращенного при деформации в мартенсит.

Учитывая вышеизложенное, можно полагать, что при обработке поверхностным пластическим деформированием возникает большое количество различно направленных дислокаций, которые, накладываясь, друг на друга, увеличивают сопротивление сдвиговой деформации. Последнее также способствует повышению прочности деформированного слоя. При пластической деформации величина соответствующих деформирующих напряжений уменьшается по мере их удаления от поверхности контакта. Следовательно, процессы размножения дислокаций, дробление кристаллов на блоки и другие сопутствующие явления, вызывающие упрочнение, имеют затухающий характер, и более упрочненной оказывается самая верхняя часть пластически деформированного слоя. Здесь, в данном поверхностном слое материала, как следует ожидать, зерна, приобретут определенную ориентировку (произойдет вытягивание зерен в направлении главной деформации), создадут, так называемую, текстуру деформации.

Пластическая деформация существенно влияет на физические свойства металла: повышается твердость, предел прочности и предел текучести. Однако характеристики пластических свойств металла, напротив, снижаются,

прочность может быть повышена в 1,5-3 раза и одновременно в несколько раз снижены относительное сужение, относительное удлинение и ударная вязкость. Важным обстоятельством является увеличение удельного объема (снижение плотности) деформированного металла, происходящее вследствие увеличения плотности дислокаций. Например, плотность стали в отожженном состоянии равна $7,865 \text{ г/см}^3$, а после холодной деформации снижается до $7,78 \text{ г/см}^3$ [106].

Эффективность обработки поверхностным пластическим деформированием зависит от режима, характера деформации, состояния и свойств металла обрабатываемой детали, а также формы и размеров деформирующего инструмента. Упрочнение в значительной степени зависит от величины удельных напряжений, а также размеров площади контакта между обрабатывающим инструментом и деформированной поверхностью. При увеличении давления деформирующие напряжения также возрастают, увеличивается скорость размножения дислокаций, что, в конечном счете, приводит к более интенсивному упрочнению.

Установленная зависимость повышения поверхностной твердости от нормальной силы происходит до определенного предела, после которого наблюдается ее некоторое снижение (рисунке 2.7).

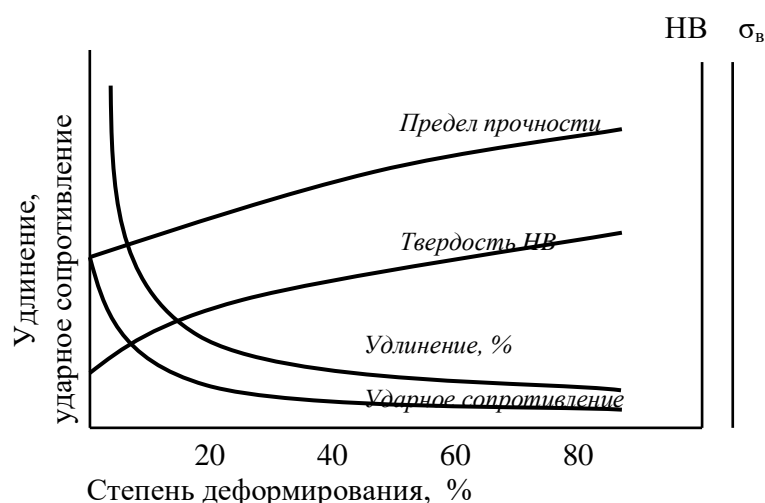


Рисунок 2.7 – Характер изменения механических свойств металла поверхностного слоя от степени деформации

Папшевым Д.Д. исследовался ряд углеродистых сталей ферритно-перлитной структурой. Результаты исследования показывают, что при поверхностном деформировании максимальное упрочнение достигается у каждого материала при определенном давлении (рисунок 2.8). У более мягких и пластичных – при меньшем, а у твердых и менее пластичных, наоборот, при большем давлении. У АРМКО-железа прирост твердости прекращается при давлении: 160 кгс/мм^2 , чему соответствует нормальная сила $P_H = 50 \text{ кгс}$, а у сталей 20, 45 и У8 соответственно при давлении $180, 210$ и 220 кгс/мм^2 , или силах $100, 180$ и 200 кгс .

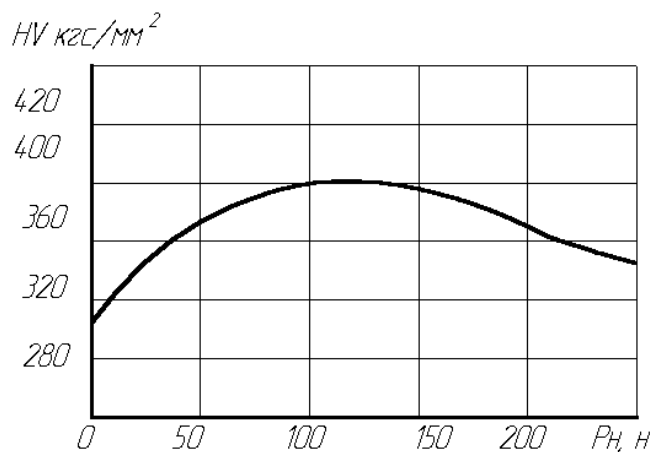


Рисунок 2.8 – Повышение поверхностной твердости от нормальной силы

Наибольшее упрочнение получило легированная сталь, имеющее ферритную структуру, а наименьшее – сталь У8 со структурой перлита. В сталях с ферритно-перлитной структурой степень упрочнения снижается с увеличением перлита. Если встали 20 поверхностная твердость повысилась в 1,8 раза, то встали 45, содержащей больше перлита, – в 1,6 раза, а встали У8 – в 1,55 раза. Если для достижения максимальной твердости обкатывание производится с давлениями выше требуемых, то происходит перенаклеп и снижение твердости. При давлениях, достигающих критического значения, начинается шелушение, т. е. разрушение поверхности.

Увеличение скорости размножения дислокаций сокращает время действия деформирующих напряжений. Следовательно, пластическая деформация из-за недостатка времени протекает в меньшем объеме металла. Вследствие этого при неизменном давлении повышается величина деформирующих напряжений. Последнее увеличивает интенсивность размножения дислокаций и ускоряет процесс образования тонкой структуры (раздробление кристаллов на блоки), что вызывает более сильное упрочнение. Глубина упрочненного слоя в этом случае снижается. Необходимо иметь в виду, что влияние скорости деформирования резко проявляется при переходе к удару (чеканка, обработка дробью, ударное накатывание). Увеличение скорости при обкатывании до максимальных значений, применяемых на практике, приводит главным образом к изменению градиента наклепа [3, с. 9-10; 18; 25].

В процессе пластической деформации происходят искажения кристаллической решетки, затрудняющие дальнейшее скольжение. В противовес этому тепловое движение атомов способствует уменьшению искажений, а, следовательно, создает более благоприятные условия для сдвиговой деформации. Эффект теплового движения зависит от температуры деформации. По мере ее снижения уменьшается роль теплового движения атомов и увеличивается получаемое упрочнение. При большой степени пластической деформации практически вся энергия переходит в теплоту. Это тепло оказывает воздействие на протекание процесса деформации; в частности,

снижение деформационных искажений при повышенной температуре может снизить упрочнение при обкатывании и выглаживании [16, p. 158].

На величину поверхностной твердости оказывают влияние режимы процесса. Эффект подачи в значительной степени определяется размерами активной зоны деформации, которые зависят от контактного давления, характеристик материала и размеров деформирующего инструмента. При уменьшении активной зоны деформации, что происходит при снижении давления, увеличении твердости материала и уменьшении размеров инструмента, влияние подачи усиливается, и при ее увеличении наблюдается заметное снижение прироста поверхностной твердости. В частности, более сильное влияние подачи на поверхностную твердость при обработке закаленных сталей объясняется уменьшением зоны деформации по сравнению с обработкой мягких сталей.

В процессе выглаживания и обкатывания количество рабочих ходов, а также подача и скорость, существенно влияют на производительность процесса. Поэтому стремитесь к достижению требуемого упрочнения за один рабочий ход. При увеличении числа рабочих ходов возрастает количество повторных деформаций, что влияет на поверхностную твердость. Важно учесть влияние дополнительных рабочих ходов, принимая во внимание давление и подачу. Если давление ниже оптимального уровня, то повторные рабочие ходы (до определенного предела) способствуют увеличению поверхностной твердости. Однако при достижении оптимального давления увеличение твердости прекращается уже после второго или третьего рабочего хода.

Допустимое число ходов зависит также от подачи. Поскольку с увеличением подачи уменьшается число повторных деформаций, то число ходов может быть увеличено, и наоборот. Таким образом, изменением величины подачи можно регулировать число рабочих ходов.

При обкатывании и выглаживании необходимое упрочнение при заданном контактном давлении достигается, по-видимому, при определенном числе повторных деформаций. Если число деформаций меньше требуемого, то для получения такой твердости необходимо снизить подачу или увеличить число рабочих ходов. В тех случаях, когда изменять подачу и число ходов нецелесообразно, необходимо повысить давление. Таким образом, путем повторных рабочих ходов может быть повышена степень упрочнения, но не глубина.

Вариация скорости обработки от минимальных до 200 м/мин не приводит к значительному увеличению поверхностной твердости. Поэтому существует представление, что скорость не влияет на эффективность упрочнения. В самом деле, при повышении скорости с 8-12 до 160-180 м/мин прирост твердости оказывается незначительным. Однако ключевым фактором является изменение градиента наклепа. С ростом скорости градиент наклепа увеличивается, в то время как глубина имеет тенденцию к уменьшению. Это утверждение подтверждено в нескольких исследованиях других авторов.

2.5 Исследование глубины наклепа

В начале статического или ударного воздействия на обрабатываемую поверхность формируется отпечаток инструмента. Со временем этот отпечаток может превратиться в смежные следы или ряд отпечатков.

Упрочненный слой представляет собой область, характеристики которой отличаются от характеристик основного материала. Однако граница между упрочненным слоем и основным материалом часто нечетка из-за изменения контролируемого параметра вблизи этой границы с небольшим градиентом. В связи с этим толщина упрочненного слоя всегда определяется с некоторой погрешностью, которая зависит от метода измерения и свойств материала. Первые признаки искажения кристаллической структуры обычно обнаруживаются с помощью физических методов исследования на большей глубине, чем первые признаки увеличения микротвердости или искажения координатной сетки. Поэтому понятие толщины упрочненного слоя является относительным, и численные значения, указанные в различных источниках, могут отличаться на десятки процентов.

При нагружении статической или ударной силой инструмент вдавливается в обрабатываемый материал. Сначала происходит упругая деформация поверхностного слоя, после этого происходит пластическая (линия ОАВ на рисунке 2.9). В результате пластических деформаций обратный процесс идет по линии ВС. Остаточная пластическая деформация выражается размером отпечатка d , соответствующего участку ОС. ППД под отпечатком элемента распространяется плавно, равномерно и копирует собственную поверхность инструмента с небольшими искажениями [43, с. 3-56].

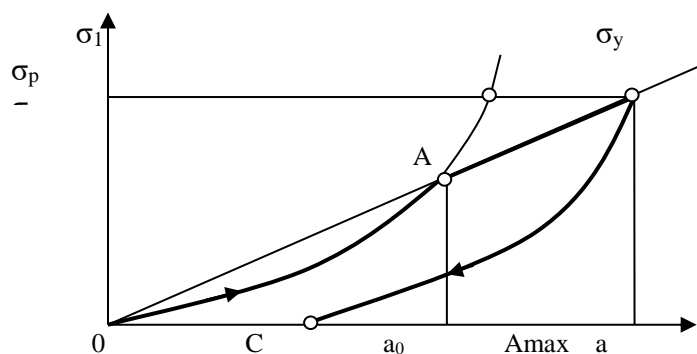
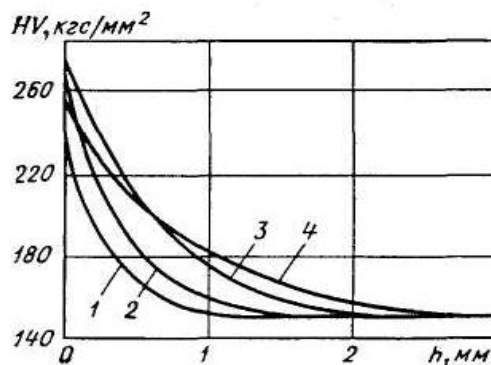


Рисунок 2.9 – Зависимости пластической и упругой деформации в зависимости от напряжения



1 – 25 кгс; 2 – 75 кгс; 3 – 100 кгс; 4 – 150 кгс

Рисунок 2.10 – Распределение твердости в поверхностном слое образцов из стали 20, обкатанных с различными силами

В соответствии с рисунком 2.10, глубина наклепа h пропорциональна глубине отпечатка h_1 т.е. $h = mh_1$. Для различных условий обработки коэффициент $m = 2 \dots 20$.

Связь между диаметром отпечатка (d) и нагрузкой (P), когда шар внедряется в упругую и пластическую области, описывается уравнением Герца и Мейера, формула (2.9):

$$P = \frac{1}{3D \left(\frac{1-\mu^2}{E} + \frac{1-\mu_1^2}{E_1} \right)} d^3 \quad (2.9)$$

$$P = ad^n$$

где D – диаметр шара;

E, E_1 – модули упругости раскатного шарика и обрабатываемого материала;

$\mu; \mu_1$ – коэффициент Пуассона для раскатного шарика и металла;

$a, n = 2$ – константа пластичности материала.

Данные формулы применимы для деформации без учета трения, когда взаимодействующие тела являются изотропными, следуют закону Гука, область контакта невелика, и нагрузки прикладываются перпендикулярно обрабатываемой поверхности. Тем не менее, процессы пластической деформации происходят в более сложных условиях, поэтому применение этих формул ограничено. Тем не менее, они позволяют выявить основные силовые зависимости при пластической деформации: $\varepsilon = d/D$, где d – диаметр полученного отпечатка (лунки); D – диаметр полученной вдавливаемой сферы или шара.

Для каждого из методов ППД и вида ППД, а так же различных видов обработки $\varepsilon = 0,1 \dots 0,9$; а для конструкционных сталей $\varepsilon = 0,3 \dots 0,7$.

Глубина, до которой достигает пластическая деформация в процессе обкатывания и выглаживания, зависит от давления, механических

характеристик и структуры стали [7, с. 84-88]. Глубина наклепа зависит от размера контактной площади. Глубина упрочненного слоя определяется удельным давлением на контактной площади и ее размерами. Однако степень упрочнения зависит только от давления.

Величина глубины наклепа определяется по формуле (2.10):

$$h = k \cdot \sqrt[n]{F}, \quad (2.10)$$

где k и n – коэффициенты, которые зависят от размерных параметров инструмента, и размеров и марки материала детали.

Влияние давления, выраженного через нормальную силу P_n , на глубину наклепа стали 20 с ферритно-перлитной структурой показано на рисунке 2.9, из которого видно, что глубина наклепа возрастает с увеличением давления. Если у образцов из стали 20, обкатанных шаром диаметром 10 мм с силой 25 кгс глубина наклепа составила 1,1 мм, то после обкатывания с силой 150 кгс глубина стала 2,6 мм. Аналогичная зависимость характерна для углеродистых и легированных сталей.

При одинаковом давлении глубина проникновения пластической деформации больше у материалов с более низким пределом текучести. Например, при давлении в контакте 240 кгс/мм² глубина наклепа составила 2,6 мм для образцов из стали 20 и всего 1,4 мм для образцов из стали 14Х2Н3МА с более высоким пределом текучести.

Следовательно, у деталей из мягких сталей можно достичь глубокого наклепа при значительно меньших силах по сравнению с более твердыми и прочными сталями. В процессе выглаживания, даже с учетом более значительного увеличения поверхностной твердости, пластическая деформация проникает на меньшую глубину, и слой наклепа у выглаженных образцов оказывается гораздо тоньше, по сравнению с обкатанными.

При обработке с силами, превосходящими оптимальные и приводящие к перенаклепу и снижению твердости, глубина наклепа продолжает увеличиваться. Однако не следует рекомендовать применение таких сил для получения глубокого наклепа, так как перенаклеп отрицательно сказывается на эксплуатационных свойствах деталей машин.

Глубина наклепа h связанная с силой деформирования P может быть определена по формуле (2.11) С.Г. Хейфица

$$h = \sqrt{P/(2\sigma_T)}, \quad (2.11)$$

где σ_T – предел текучести материала.

Кудрявцев И.В. и Петушков Г.Е. [25] предложили ввести коэффициент m , косвенно учитывающий размеры контактной площади (2.12):

$$h = \frac{1}{m} \sqrt{P/(2\sigma_T)} \quad (2.12)$$

Глубину наклепа можно регулировать изменением размеров деформирующего инструмента. При постоянном давлении в контакте уменьшение глубины наклепа вызывается уменьшением контактной площади, а, следовательно, и зависящей от нее нормальной силы P_n .

2.6 Анализ упрочнения металла поверхностного слоя при обработке резанием

При обработке резанием (развертывание) под действием прилагаемых усилий в металле поверхностного слоя происходит пластическая деформация:

1. Скольжение в кристаллических структурах приводит к снижению структурных несоответствий, что уменьшает их устойчивость. Устранение этих несоответствий частично восполняет обычно сниженную практическую прочность кристаллов, увеличивая значение критического сдвигового напряжения.

2. В области плоскостей скольжения происходит искажение кристаллической решетки, включая поворот вблизи плоскостей скольжения и упругие искривления этих плоскостей.

3. Полосы скольжения разделяют кристалл на мелкие части в виде пластинок, превращая его в поликристалл, состоящий из мелких вытянутых зерен.

Измелчение зерен поликристалла усиливает эффект блокирования плоскостей скольжения одного зерна соседними зернами с другой ориентировкой кристаллической решетки, поэтому скольжение, начавшееся в одном зерне, не может свободно развиваться далее и тормозится соседними зернами [29, с. 150].

4. В процессе скольжения происходит вытягивание зерен поликристалла в направлении деформации, в результате чего создается определенная ориентировка тонких вытянутых зерен (текстура деформации).

5. В процессе пластической деформации поликристаллов изменение формы кристаллических зерен способствует их механическим зацеплениям и затрудняет взаимное перемещение.

6. При скольжении и соприкосновении кристаллов относительно друг друга на плоскостях скольжения возникают обломки от зерен, которые создают шероховатость поверхности скольжения, что, в свою очередь, замедляет перемещение.

Упрочнение является атермическим процессом. Степень и глубина наклепа зависят от степени пластической деформации металла поверхностного слоя, в свою очередь зависящей от величины и продолжительности воздействия внешних сил, вызывающих деформацию, и от пластических свойств деформируемого металла. При этом большое влияние на способность к упрочнению оказывает его структура. Самое большое упрочнение при наклепе металла у мягких сталей с феррит-перлитной структурой и у твердых сталей с мартенситной структурой.

Все описанные процессы, которые происходят при пластической деформации поликристаллов, ведут к общему укреплению (или наклепу)

деформированного металла. В результате такого укрепления при пластической деформации все показатели сопротивления деформации (такие как предел текучести, предел прочности, твердость и т.д.) увеличиваются, в то время как пластичность снижается (это проявляется в уменьшении относительного удлинения при разрыве, относительного сужения и т.д.). Кроме того, изменяются и некоторые физические свойства металла. Если металл был предварительно укреплен, то при его пластической деформации увеличение показателей сопротивления деформации происходит значительно медленнее, чем при деформации металла, который не был укреплен.

Одновременно с упрочнением (наклепом) в металле поверхностного слоя происходит обратный процесс разупрочнение, которое возвращает в некоторой степени металлу его начальные свойства. При комнатной температуре отдых наклепанного металла протекает довольно медленно или даже отсутствует, однако при нагреве железа до 200-300°C происходит снятие искажений кристаллической решетки.

Необходимо отметить важный фактор, что отдых металла происходит не только после окончания пластической деформации, но и в период самой деформации. Одновременно протекают противоположные процесса – разупрочнение и упрочнение металла. Это объясняется таким свойством пластической деформации в металле: изменение происходит не во всем объеме одновременно, а сначала изменения происходят в благоприятно ориентированных структурных зернах металла, которые упрочняются пропорционально степени деформации. После упрочнения слоя металла для благоприятно сориентированных зерен пластически деформируются и наименее благоприятно ориентированные, и пластическая деформация охватывает весь объем металла. В этот момент в деформированных и упрочненных зернах начинается процесс разупрочнения.

Предварительная обработка резанием способствует формированию благоприятно ориентированных зерен, что, в свою очередь, упрощает ввод выглаживающей ленточки после работы режущей части.

При механической обработке на металлорежущих станках в зоне действия режущего инструмента одновременно действуют значительные силы резания, которые создают наклеп и достаточно высокую температуру, вызывающую разупрочнение основной поверхности материала металла. Итоговое состояние полученного металла и его поверхностного слоя определяется соотношением процессов упрочнения и разупрочнения, которые зависят от преобладания в зоне действия режущего инструмента силового или теплового параметра. Любое изменение режимов резания, которое тесно связано с увеличением усилий при резании и обработке металла, а также степени пластической деформации, приводит к увеличению степени поверхностного наклепа на обработанном материале. Дальнейшее увеличение продолжительности воздействия сил резания на основной материал металла детали поверхностного слоя приведёт к увеличению толщины распространения слоя наклепа. При комбинированной обработке разрабатываемым инструментом данное явление считается положительным свойством.

При последовательной обработке отверстий развертыванием наклеп поверхностного слоя материала увеличивается при увеличении режима резания - глубины резания, подачи, радиуса округления режущего лезвия и при переходе от положительных к отрицательным передним углам и т.д. (рисунки 2.11, 2.11, 2.13).

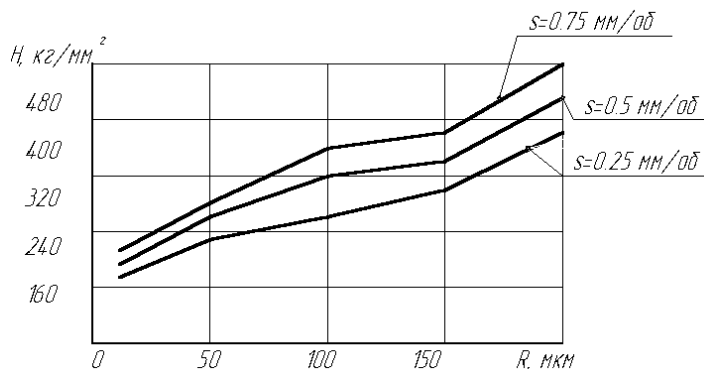


Рисунок 2.11 – Влияние радиуса скругления лезвия на наклеп металла поверхностного слоя

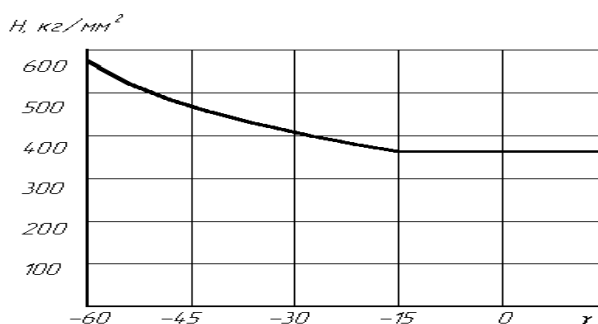


Рисунок 2.12 – Влияние переднего угла на наклеп металла поверхностного слоя

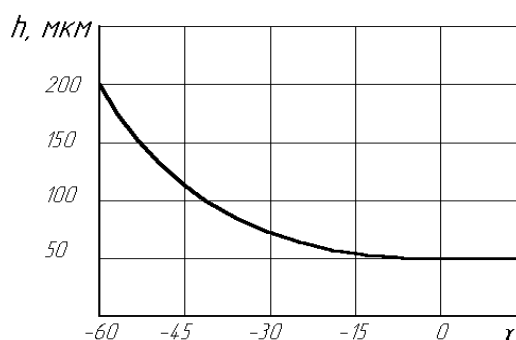


Рисунок 2.12 Влияние переднего угла на глубину наклепа металла поверхностного слоя

При увеличении скорости резания значительно сокращается время, в течение которого деформирующие силы воздействуют на основной металл. Это, в свою очередь, должно привести к уменьшению слоя глубины наклепа. Однако следует учитывать, что при повышении скорости резания также возрастает трение и происходит повышенное выделение тепла в зоне

обработки, что может ускорить процесс износа инструмента. Поэтому при увеличении скорости резания для металлов, которые не сильно подвержены структурным изменениям при резании (легированные и высоколегированные), следует ожидать снижения глубины наклепа h , но также стоит учесть полученные возможные негативные последствия, из-за повышенного трения и нагрева.

Скорость резания с одной стороны желательно увеличивать т.к. это способствует снижению выделения тепла, с другой снижается глубина наклепа, но это можно компенсировать числом работающих уплотняющих ленточек. Следовательно – высокие скорости нас устраивают.

По результатам измерения микротвердости поверхностного слоя можно оценить не только эффект упрочнения, но и глубину наклепанного слоя. Распределение микротвердости по сечению упрочненной детали ППД при базовых режимах упрочнения. Установлено, что исходная микротвердость заготовки после механической обработки резанием на токарном станке составляет 80-85 HRB.

2.7 Остаточные напряжения в поверхностном слое при процессе ППД

Остаточные напряжения принято классифицировать следующим образом: остаточные напряжения нулевого рода, возникающие в системе взаимосвязанных тел (например, при горячей посадке втулки на вал); остаточные напряжения первого рода (макроскопические), уравнивающиеся в макрообъемах тела; остаточные напряжения второго рода (микроскопические), уравнивающиеся в микрообъемах тела, соответствующих размерам зерен; остаточные напряжения третьего рода (субмикроскопические), уравнивающиеся в чрезвычайно малых зонах, соизмеримых с размерами межатомных расстояний.

При исследовании остаточных напряжений применяются механические и электрические методы измерения деформаций образца или после снятия с него напряженных слоев или в процессе их удаления, например, при электрохимическом травлении. Механические методы измерения деформаций очень трудоемки и не всегда обеспечивают необходимую точность. Поэтому отдается предпочтение электрическим методам, основанным на регистрации деформаций по изменению емкости конденсатора при сближении или удалении друг от друга его пластин, жестко связанных с испытуемым образцом. Хорошие результаты дает также метод, разработанный Б.А. Кравченко, по которому измерение деформаций осуществляется по прогибу специальной пластинки, связанной с образцом. В данной работе использовался цифровой тензометрический мост ЦТМ-5, фиксирующий относительные деформации наружного диаметра втулки.

Эпюры остаточных напряжений в поверхностном слое образцов из стали 45 с ферритно-перлитной структурой показывают [47, с. 103], что с повышением давления при обкатывании шаром происходит рост абсолютного значения и глубины залегания напряжений. Максимальная остаточная напряженность обнаружена у образцов, обкатанных с силой 175 кгс. Такому

давлению соответствует максимальная твердость и близкая к минимальной шероховатость поверхности. При силе 300 кгс величина напряжений сжатия у поверхности снижается, а их максимум оказывается сдвинутым в глубину. Толщина сжатого слоя в этом случае наибольшая. Дальнейшее повышение давление усиливает снижение напряжений у поверхности и смещение максимума в глубину сжатого слоя.

Следует подчеркнуть, что приложение равных нормальных сил вызывает неодинаковое напряженное состояние у разных сталей. При силах 50 кгс и 200 кгс максимальные напряжения сжатия у образцов из стали 20 меньше, а глубина их залегания больше по сравнению с напряжениями сжатия у образцов из стали У8. Объясняется это различными свойствами сталей и разницей удельных давлений и контактных площадок при одних и тех же нормальных силах. Таким образом, различное распределение остаточных напряжений по сечению образца существенно зависит от свойств материала детали. Обработка прочных и твердых сталей приводит к образованию напряжений с меньшей глубиной их залегания до перемены знака, но и с более высоким максимальным значением. Величина осевых остаточных напряжений во всех случаях значительно превышала тангенциальные.

Если обкатывание производится шарами большего диаметра, то из-за увеличения контактной площади глубина залегания напряжений сжатия возрастает. Например, в образцах из стали 45, обкатанных шаром диаметром 30 мм с давлением в контакте 150 кгс/мм^2 , глубина залегания напряжений составила 1,7 мм, т.е. больше, нежели в обкатанных при давлении 175 кгс/мм^2 (1,3 мм), но шаром диаметром 10 мм. *Максимальное значение и градиент напряжений зависят главным образом от контактного давления.*

В процессе алмазного выглаживания также создаются остаточные сжимающие напряжения, величина и глубина залегания которых зависит от давления, размеров инструмента и свойств материала.

Максимальное значение осевых напряжений отмечено на поверхности, а тангенциальных – на некоторой глубине.

Правильно выбранный режим обработки обеспечит выполнение самых жестких требований к качеству поверхностного слоя и, следовательно, высокие эксплуатационные свойства детали. Давление в контакте можно увеличивать только до значений, вызывающих максимальную твердость. Если превзойти указанный предел, то снижается твердость и напряжения. Кроме того, напряжения понижается и вследствие перенаклепа, в некоторых сталях, обкатанных с силами, не вызывающими перенаклепа, максимальное значение тангенциальных напряжений оказалось не на поверхности, а в глубине деформированного слоя [13, с. 90].

Анализ результатов исследований показывает [41, с. 39], что наряду с давлением структурное состояние и свойства сталей являются решающими факторами, определяющими напряженное состояние поверхностного слоя.

После алмазного выглаживания во всех случаях максимум напряжений оказался выше, чем после обкатывания шаром. Это является следствием более

интенсивной деформации, происходящей при выглаживании в очаге деформации меньшего объема.

На основании вышеизложенного, можно сделать вывод: возрастание максимальной величины осевых и тангенциальных остаточных напряжений с увеличением нормальной силы при работе деформирующего элемента комбинированной развертки происходит до определенной силы для каждого материала, с превышением которой напряжения снижаются.

Степень влияния подачи на остаточные напряжения зависит от контактного давления. При оптимальных давлениях изменение подачи в пределах, рекомендуемых для отделочно-упрочняющей обработки, практически не отражается на напряженности поверхности слоя. Однако дальнейший рост подачи вызывает уже существенное снижение напряжений при обработке с низкими давлениями влияние подачи проявляется более резко.

В работах Папшева Д.Д. продемонстрировано, что снижаются напряжения при очень малых подачах при обкатывании шаром с оптимальными давлениями. Такое явление связано с перенаклепом, вызываемым многократными повторными деформациями, происходящими при малых подачах. Анализ экспериментальных данных показывает, что наиболее благоприятная напряженность образуется при обработке с подачами, рекомендуемыми для получения равномерного упрочнения.

Влияние повторных рабочих ходов на остаточные напряжения, равно как и подачи, зависит от давления. При высоких давлениях, когда имеет место перенаклеп, повторные рабочие ходы снижают величину напряжений.

Результат остаточных напряжений, возникающих в поверхностном слое при обработке деформирующим инструментом деталей машин, можно объяснить следующими факторами и причинами:

1. При обработке поверхности материала режущим инструментом в его поверхностном слое происходит пластическая деформация, сопровождающаяся упрочнением и изменением некоторых физических свойств металла. По данным М.Г. Окнова [2, с. 82-86] пластическая деформация материала может вызывать незначительное уменьшение плотности основного материала, значения удельного веса, и, как следствие, увеличение его собственного удельного объема, который достигает 0,25...0,75% от общего значения удельного объема до проведения обработки методом пластической деформации металла. Это увеличение основного материала может распространяться не только по направлению глубины проникновения сил при пластической деформации, но так же не затрагивает более глубоких слоев металла.

Увеличению объема металла при пластической деформации поверхностного слоя всегда препятствуют постоянно связанные с данным слоем недеформированные слои, находящиеся на глубине, как итог в наружном слое возникают различного рода сжимающие, а в нижележащих слоях – достаточно растягивающие остаточные напряжения кристаллитов металла.

2. При удалении от обрабатываемой резанием поверхности точением и получением сливной стружки, когда изменение зерна металла после пластического деформирования верхнего слоя по направлению процесса

резания материала, происходит дополнительное изменение в виде вытягивания под воздействием совместной с обрабатываемой поверхностью сливной стружки по направлению её схода. Здесь могут происходить следующие явления: изменение кристаллических зерен в поверхностном слое (вертикальное вытягивание и горизонтальное сжатие), этот процесс достигает появления в направлениях режимов резания (скорости и подачи) остаточных напряжений – растяжения.

3. Комбинированный режущий инструмент – развертка с раскатным элементом, снимающая с обрабатываемой поверхности металлическую сливную стружку, так же дополнительно вытягивает кристаллические зерна поверхности металла, где прошел резец, которые изменяются под действием упругой и пластической деформации растяжения по направлению резания материала металла. Трение по задней поверхности режущего элемента об обрабатываемую поверхность способствует вытягиванию кристаллических зерен материала в поверхностном обработанном слое. После того как происходит удаление инструмента, либо он переходит в следующее положение момента резания, растянутые верхние слои металла, связанные между собой слои целой частью с подлежащим слоем зерен основного материала металла, получают повышенные остаточные напряжения в зоне сжатия слоя, последние могут быть сориентированы в основных направлениях режимов резания при обработке металла комбинированным инструментом. В результате обработки гладкой цилиндрической поверхности гильзы, в нижних слоях уже обработанной поверхности возникает и распространяется уравнивающая сила, выравнивающая напряжения. В обратном направлении, когда при подаче возникает сила перпендикулярном по направлению к скорости резания, которая проходит как упругая и пластическая деформация кристаллитов материала в металле, вызывающей остаточных или осевые напряжения, у которых величина и знак могут быть одинаковы или различны, и не совпадать с полученным значением и знаком остаточных напряжений в слое. В данном случае остаточные напряжения ориентированы по направлению режима: скорости резания.

4. Тепло, которое выделяется при лезвийной обработке металлов, нагревает в короткое время поверхностный слой металла до экстремально высоких температур и происходит увеличение удельного объема детали. В нагретом металле не возникает внутренних напряжений, так как модуль упругости для стали уменьшается до минимального значения, и пластичность материала увеличивается. После того как действие комбинированного металлорежущего инструмента прекращается происходит охлаждение материала верхнего слоя, которое приводит к сжатию, в то же время слои расположенные ниже верхних слоев металла препятствуют этому из-за постоянной температуры без нагрева. По итогу на наружных обработанных слоях материала образуются высокие остаточные напряжения растяжения, в то время как в нижних слоях установившиеся уравнивающие напряжения сжатия.

5. При лезвийной механической обработке металлов резанием (могут быть подвержены внутренним фазовым превращениям), нагрев зоны резания вызывает большие структурные изменения, что связано с объемными характеристиками основного обрабатываемого металла. В результате такой обработки во слоях основного металла с более высоким значением удельного объема развивается напряжение сжатия, а в слоях с уменьшенным удельным объемом появляются остаточные напряжения растяжения зерен. Если, например, сталь с мартенситной структурой подвергается шлифовке с использованием грязного шлифовального круга, или при недостаточном охлаждении, или при неправильных режимах, это может привести к прижегам. В результате в определенных местах поверхности металла возможно образование структуры типа сорбит, имеющую меньший удельный объем.

Каждое из названных выше условий при комбинированной обработке металлов может преобладать в той или иной мере, и она будет являться определяющей при расчете характере и величины размещения остаточных напряжений в слое металла. Так же возможно, что все названные режимы обработки могут сильно влиять на свойства поверхностного слоя основного материала, поэтому распределение остаточных напряжений на глубину обработанного поверхностного слоя образует сложный по описанию и характеристикам вид.

Модификация методов и параметров обработки приводит к изменению напряженного поля в зоне резания и специфического значения тепла, что влияет на формирование остаточных напряжений. Это приводит к тому, что как амплитуда, так и знак остаточных напряжений в металле поверхностного слоя меняются. В большинстве случаев, когда изменяются методы обработки и режимы резания, что усиливает влияние силового поля и степень пластической деформации, это приводит к увеличению сжимающих остаточных напряжений и снижению растягивающих напряжений. Однако при обработке пластичных металлов усиление влияния силового поля вызывает увеличение растягивающих и снижение сжимающих напряжений. Изменение режимов резания и условий обработки, которое приводит к повышению мгновенной температуры нагрева металла поверхностного слоя и усиливает влияние теплового фактора, приводит к увеличению остаточных напряжений растяжения, снижению остаточных напряжений сжатия или к преобразованию сжимающих остаточных напряжений в растягивающие.

Знак остаточных напряжений зависит от степени завершенности фазовых превращений и отношения объемов структурных элементов соседних слоев металла в поверхностном слое. При этом, большую роль в формировании остаточных напряжений играют химический состав металла, его способность к структурным преобразованиям, пластичность, упругость, теплопроводность, термопроводность и другие механические и физические свойства обрабатываемого материала.

Тепловые остаточные напряжения растяжения могут возникать в поверхностном слое обрабатываемого изделия только в том случае, если внутренние напряжения, возникающие при нагревании, превзойдут по своей

величине предел текучести материала и в нем произойдет термопластическая деформация.

Повышение скорости резания может вызвать появление дополнительных тепловых остаточных растягивающих напряжений.

Увеличение подачи приводит к росту пластической деформации металла поверхностного слоя и сопровождается ростом остаточных напряжений растяжения.

При увеличении положительных передних углов резания остаточные напряжения растяжения возрастают.

Затупление режущего инструмента способствует увеличению остаточных напряжений растяжения и глубине их распространения.

В процессе комбинированной обработки, появление остаточных напряжений после механической обработки обеспечивает равномерное пластическое деформирование в ходе последующей комбинированной обработки.

2.8 Механизм образования микронеровностей обработанной поверхности

При обработке методами ППД образуется поверхность с определенной шероховатостью, которая зависит от параметров механической обработки резанием.

Пластическое деформирование происходит как в направлении движения инструмента, формируя волну, которая перемещается вместе с ним, так и в противоположном направлении, вызывая искажение ранее сформированного ближайшего микропрофиля.

Изменение угла φ и ширины ленточки b влечет за собой изменение не только высоты, но и формы неровностей. Теоретическая высота гребешков шероховатости будет определяться (рисунок 2.12):

$$\begin{aligned} CD &= H \cdot \operatorname{ctg} \varphi_1; & DE &= H \cdot \operatorname{ctg} \varphi; \\ CD + DE + b &= S = H \cdot \operatorname{ctg} \varphi_1 + H \cdot \operatorname{ctg} \varphi + b = H \frac{\sin \varphi + \sin \varphi_1}{\sin \varphi \cdot \sin \varphi_1} + b; \end{aligned}$$

Откуда

$$H = (S - b) \frac{\sin \varphi \cdot \sin \varphi_1}{\sin \varphi + \sin \varphi_1}; \quad (2.13)$$

Можно сказать, что чем шире ленточка, тем ниже высота гребешков неровностей. Ограничивает ширину b контактное давление.

Чтобы устранить схватывание обрабатываемого материала с уплотняющей ленточкой, ширина ленточки должна быть меньше длины волны внеконтактной деформации (при бесконечной толщине стенки детали).

Оптимальная ширина ленточки 0,15-0,5 мм для материалов с $\sigma_B=0,24\dots 1,9$ ГПа, (рисунок 2.13).

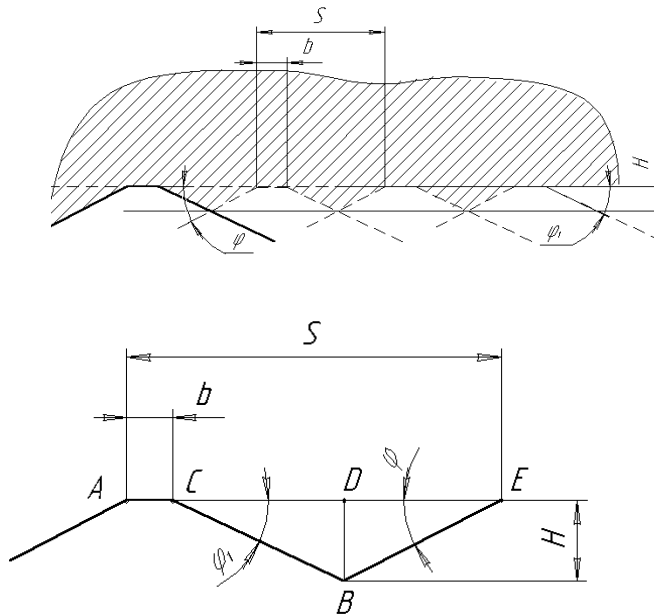


Рисунок 2.12 – Теоретический расчет высоты неровностей

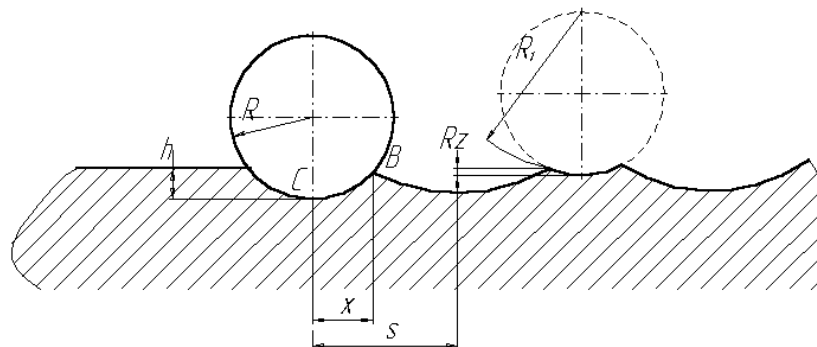


Рисунок 2.13 – Схема к расчету высоты неровностей

Высота микронеровностей при выглаживании или раскатывании по рекомендациям проф. Чебышева определяется по формуле (2.14):

$$Ra = R - \sqrt{R^2 - \frac{s^2}{4}}; \quad (2.14)$$

Так же для режимов обработки с подачей от 0,04 до 0,8 мм/об и радиусом инструмента от 1,1 до 20,0 мм преобразовать и принять:

$$Ra = \frac{s^2}{8R}; \quad (2.15)$$

где R – радиус инструмента.

Для нашего случая в ходе обработки материал детали подвергается упругому деформированию. Максимальная деформация наблюдается в точке С. В то время как в точке В, расположенной на вершине неровности, деформация достигает минимального значения (рисунок 2.12), в результате при анализе упругого восстановления материала высота микронеровностей будет отличаться от значения определенных по формуле (2.15). Это отличие должно быть равно разнице величин между упругой деформации материала в точках С и В.

На основании сказанного можно составить следующее равенство:

$$Ra = \left[\frac{s^2}{8R} - (\varpi_C - \varpi_B) \right], \quad (2.16)$$

где ϖ_C и ϖ_B – значение упругой деформации в заданных точках С и В.

Упругое искажение неровностей можно оценить с использованием задачи Герца. Из теории упругости знаем, что когда два тела находятся в упругом контакте, происходит их смещение. ω - это смещение от местной деформации точек первого и второго тела в направлении, в котором действует сила. Это определяется следующим образом: $\varpi_1 + \varpi_2 = \alpha - \beta x^2$, где x – расстояние точек от оси или от центра; β - const, зависящая от радиуса кривизны; α - сближение обоих тел.

В точке С $x=0$, и, следовательно, $\varpi_1 + \varpi_2 = \alpha$.

При одинаковых упругих свойствах обоих тел, что вполне справедливо для обкатки, а следовательно и для нашей комбинированной обработке,

$\varpi_1 = \varpi_2 = \varpi$ и $2\varpi = \alpha$. Поэтому $\varpi_C = \frac{\alpha}{2}$. Для точки В можем записать

$$\varpi_B = \frac{\alpha}{2} - \frac{1}{2} \beta x^2.$$

Разница в величине упругой деформации вершины и впадины гребешка будет равна: $\varpi_C - \varpi_B = \frac{1}{2} \beta x^2$. Если учесть, что $x = \frac{s}{2}$, то $\varpi_C - \varpi_B = \beta \frac{s^2}{8}$.

В результате упругого возврата, который происходит после прохождения деформирующего инструмента, радиус впадины R_1 , больше радиуса инструмента R , т.е. $R_1 > R$.

В данном случае искомая постоянная $\beta = \frac{R_1 - R}{2R_1 R}$. Величину R_1 можно представить следующим образом $R_1 = KR$, где K – коэффициент, характеризующий увеличения радиуса впадины. Тогда $\beta = \frac{K-1}{2KR}$, и разница в величинах упругой деформации вершины и впадины гребешков:

$$\varpi_C - \varpi_B = \frac{K-1}{K} \frac{s^2}{16R}$$

Высота всех микронеровностей с учетом упругой деформации определяется из выражения:

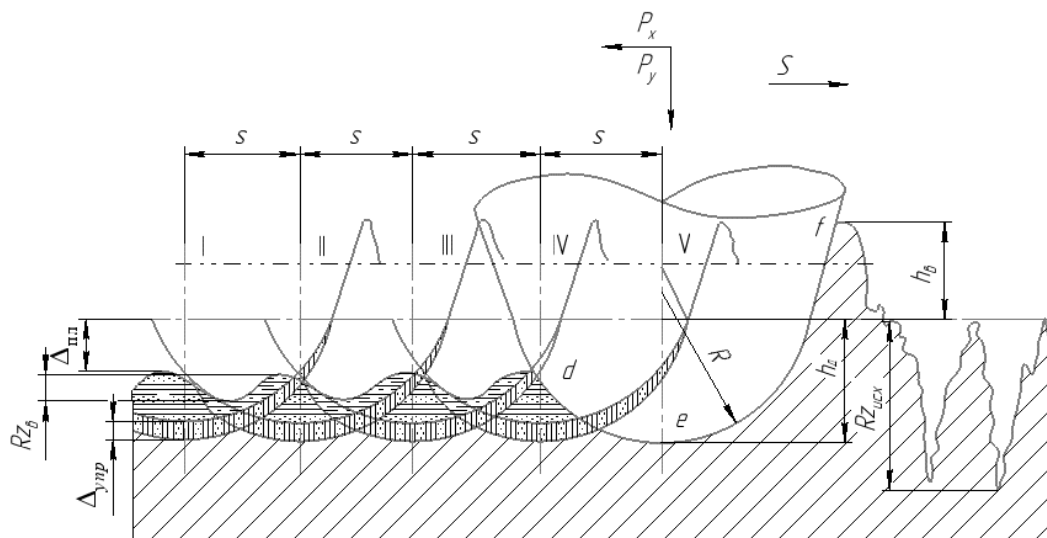
$$R_z = \left[\frac{s^2}{8R} - \frac{(K-1)}{K} \frac{s^2}{16R} \right] = \frac{s^2}{8R} \left(1 - \frac{K-1}{2K} \right); \quad (2.17)$$

Чтобы учесть степень искажения микропрофиля поверхности при многократных деформациях, в формулу (4) следует включить коэффициенты, отражающие пластические характеристики материала K_ϵ и давление на контактной площади K_p . В этом случае

$$R_z = \frac{s^2}{8R} \left(1 - \frac{K-1}{2K} \right) K_\epsilon K_p \quad (2.18)$$

Выражение (2.18) является более точным при сравнении с (2.13) и (2.14) и его можно применить для определения микронеровностей при комбинированной обработке с углом рабочего конуса деформирующего элемента 4° .

По данными Д.Б. Гогоберидзе (выведенными для отделочно-упрочняющей обработке раскатыванием и выглаживанием), $K = 2,6 \div 2,1$ (для мягких сталей при нагрузках на деформирующий элемент от 125 до 250 кгс). При обработке с оптимальными давлениями $K_p = 1$; для углеродистых сталей $K_\epsilon = 1,3 \div 2,1$.



I-V – последовательные положения инструмента после каждого оборота; 1 – профиль положения следа инструмента; 2 – полученный профиль обработанной поверхности; 3 – упругое восстановление поверхности; 4 – пластическое деформирование профиля

Рисунок 2.14 – Схема деформации поверхности

В соответствии с рисунком 2.14, рассмотрим деформацию обработанного поверхностного слоя в направлении подачи. При движении раскатного инструмента вдоль оси обрабатываемой заготовки, он распространяет материал деформированных поверхностных слоев неровностей по двум направлениям. Это приводит к формированию валика из деформированного металла h_b со стороны исходной поверхности. С обработанной стороны образуется искажение профиля, которое образуется при предыдущих вращениях цилиндрической детали, в результате пластического изменения основного металла, вытесняемого деформирующим элементом в сторону обработанной поверхности. Больше всего искажается профиль желоба, который образовался при предыдущем вращении обрабатываемой детали. Далее, после каждого оборота детали след инструмента перемещается в осевом направлении на величину заданной подачи S . В процессе последующих обработок детали, ее поверхность многократно перекрывается, поскольку ширина канавки превышает величину подачи. Взаимодействие с обрабатываемой поверхностью осуществляется вдоль дуги def . Из-за образования валика деформированного металла h_b на необработанной поверхности, правая часть цилиндра (при движении в направлении подачи) испытывает значительно большую нагрузку (контакт происходит по дуге ef), чем левая часть цилиндрической поверхности (контакт по дуге de).

Степень упрочнения поверхностного слоя после ППД определена по формуле (2.19):

$$CH = \frac{HV_2 - HV_1}{HV_1} \cdot 100\%; \quad (2.19)$$

где HV_1 – исходная микротвердость поверхности обрабатываемого материала;
 HV_2 – микротвердость поверхности после обработки ППД.

Результаты расчета степени упрочнения в зависимости от основных параметров и режимов ППД представлены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Влияние основных параметров ППД на степень упрочнения

Величина продольной подачи, мм/об	0,04	0,06	0,07	0,09	0,12	0,15	0,2
Упрочнение, %	50	48	45	43	40	38	35
Величина радиального натяга, мм	0,04	0,08	0,12	0,16	0,2	0,28	0,32
Упрочнение, %	45	51	58	61	65	65	45

Анализируя указанные данные, можно сделать вывод, что при ППД степень упрочнения составляет около 50 %, а при изменении основных технологических параметров и режимов ППД степень упрочнения изменяется в интервале 35 до 65 %.

Все данные были получены на приборе для измерения твердости. Во время тестирования, прибор для измерения микротвердости МЕТ, должен гарантировать выполнение следующих требований: алмазный наконечник

должен плавно внедряться в тестируемый материал под воздействием приложенной к нему нормальной нагрузки; нагрузка, приложенная к алмазному наконечнику, должна оставаться постоянной в течение заданного периода времени.

В ходе ППД обрабатываемой поверхности исходные неровности сглаживаются, формируя новый микрорельеф с гораздо меньшей высотой неровностей RaВ. Размер детали уменьшается на величину остаточной деформации.

Формирование неровностей зависит от неоднородности шероховатости (мкм) и твердости (HRC) обрабатываемой поверхности, а также от колебаний силы применяемой выглаживания, вызванных биением заготовки, инструмента и других факторов. Все это приводит к отклонению реального микрорельефа от ожидаемого. Формирование микрорельефа поверхности в результате обработки определяется следующими факторами:

- направлением рабочих перемещений комбинированного инструмента и обрабатываемой детали;
- величиной текущей исходной шероховатости в мкм;
- размером деформирующей части инструмента;
- величиной внедрения инструмента в обрабатываемую поверхность;
- пластическим течением металла;
- шероховатостью раскатной части инструмента;
- величиной упругого восстановления обработанной деформированной поверхности после обработки;
- системой СПИД.

Поверхностный слой формируется в результате пластического деформирования обрабатываемой поверхности. Когда радиальная сила F , действующая на площадку контакта между деталью и инструментом, создает контактные давления, и если эти давления превышают предел текучести, происходит пластическая деформация тонких слоев поверхности (рисунок 2.15, 2.16).

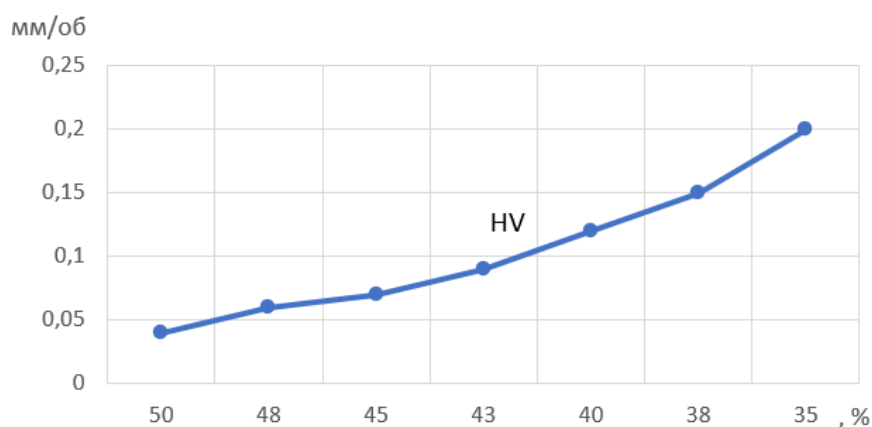


Рисунок 2.15 – Зависимость микротвердости от продольной подачи

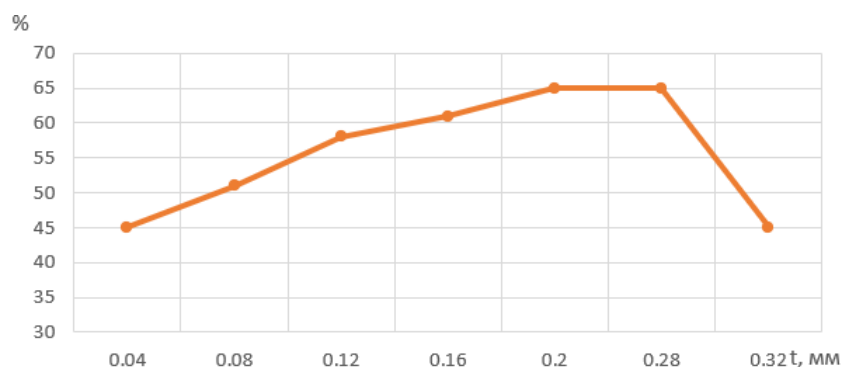


Рисунок 2.16 – Зависимость микротвердости от натяга

В результате ППД слой приобретает уникальную волокнистую текстуру, и исходная кристаллическая решетка поверхностного слоя искажается.

Таблица 2.3 – Микротвердость (HV) на поверхности детали и глубина наклепа (h)

Величина продольной подачи, мм/об	0,07	0,11	0,13	0,17	0,23
Микротвердость, HV	338	325	305	297	308
Глубина, мм	0,90	0,85	0,82	0,80	0,78
Величина радиального натяга, мм	0,05	0,07	0,10	0,15	0,20
Величина микротвердости, HV	298	331	337	344	355
Глубина, мм	0,83	0,91	0,96	1,03	1,13
Частота вращения заготовки об/мин	80	100	125	200	315
Величина микротвердости, HV	319	325	331	338	340
Глубина, мм	0,87	0,90	0,93	0,98	1,01

В соответствии с таблицей 2.3 указаны влияние основных параметров и режимов ППД на максимальную величину микротвердости и глубину наклепа. Измерения проводились вдавливанием алмазной пирамидой при нагрузке 0,490Н по ГОСТ 9450-76.

Упрочнение металлов и сплавов обусловлено торможением движущихся дислокаций. Один из путей торможения дислокаций возможен при измельчении зеренной структуры металла. Скопление дислокаций по границам зерен вызывает торможение их движения, что приводит к упрочнению металла [42, с. 284; 43, с. 44].

Выводы по второму разделу

Исследование комбинированного процесса лезвийной обработки и ППД позволяет утверждать, что ключевыми элементами, которые влияют на оптимальную шероховатость и степень упрочнения, являются: шероховатость после предварительной черновой обработки, тип материала, конструктивные характеристики инструмента (угол заборного конуса, напряжение, параметры выравнивающего элемента, количество зубьев развертки), параметры

обработки (подача, контактное давление, скорость) и характеристики заготовки (толщина обрабатываемой стенки)

Все факторы, оказывающие наиболее существенное воздействие на обработку были систематизированы и представлены в виде модели. Факторы, которые оказывают косвенное воздействие, а также взаимовлияние факторов оказывают менее существенное воздействие на результат и в модели не представлены, так как модель усложняется и теряется прямая логическая связь

Модель предназначена для определения факторов, влияющих на основные качественные показатели поверхности отверстия цилиндра, а именно: параметров шероховатости и упрочнения. Анализ условий обработки, производственный опыт, изучение литературы показали: что наибольшее влияние на параметры поверхности отверстия оказывают начальные параметры заготовки, параметры комбинированного инструмента и параметры механической обработки.

Модель показывает, что управление качественными характеристиками отверстия осуществляется через параметры обработки. Эти параметры, в свою очередь, зависят от характеристик инструмента, которые определяются с учетом материала, диаметра и толщины стенки изделия.

Определено, что с увеличением величины натяга с 0,03 до 0,15 мм микротвердость поверхностного слоя повышается на 10%, глубина упрочненного слоя при этом возрастает примерно до 1мм. Изменение продольной подачи с 0,05 до 0,2 мм/об приводит к снижению твердости поверхностного слоя. Увеличение частоты вращения заготовки до 315 об/мин, повышает микротвердость и глубину упрочненного слоя.

При использовании комбинированной обработки с применением ПЖД размер зерен в упрочненных слоях уменьшается, увеличение концентрации измельченных твердых зерен обеспечивает повышение микротвердости в поверхностном слое упрочненных цилиндрических деталях.

3 ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ КОМБИНИРОВАННОГО ИНСТРУМЕНТА И РЕЖИМОВ ОБРАБОТКИ НА КАЧЕСТВО ПОВЕРХНОСТИ

3.1 Разработка оптимальной формы деформирующего элемента

В реальных процессах обработки металлов под давлением характерно неравномерное распределение напряжений и деформаций в объеме. Это приводит к тому, что различные слои и элементы металлического тела стремятся изменить свои размеры по-разному, что противоречит целостности металла. Те слои, которые стремятся к увеличению размеров, передают растягивающие силы слоям, стремящимся к уменьшению изменению размеров. Суммарно это провоцирует физическое увеличение размеров тела заготовки или обрабатываемой детали. В то же время, слои, стремящиеся к меньшему изменению размеров, передают сжимающие силы слоям, стремящимся к большему изменению размеров, что снижает изменение размеров. В результате, в слоях, которые стремятся к максимальной деформации, возникают дополнительные силы сжатия, а в слоях, стремящихся к минимальной деформации, возникают дополнительные силы растяжения [45, с. 3-120].

Выбор формы деформирующего элемента имеет огромное значение, т.е. определяет площадь контакта инструмента с обрабатываемой деталью и определяет величину натяга.

За основу техпроцесса создания режущего инструмента принимают классификацию инструментов, согласно которой режущие инструменты по технологическим и конструктивным признакам принято разделять на четыре класса:

1. Осевой инструмент. Относят инструмент, имеющий форму тел вращения с относительно большой длиной по сравнению с диаметром: сверла, зенкеры, концевые фрезы, метчики, круглые протяжки и др. Эти инструменты могут быть цельными из быстрорежущей стали или твердого сплава, составными (сварными, а также с напаянными твердосплавными режущими (пластинами) или сборными с механическим креплением таких пластин.

2. Втулочный инструмент. К этому классу относятся инструменты, имеющие форму тела вращения с цилиндрическим или коническим посадочным отверстием: насадные зенкеры, развертки, фрезы, метчики и др.

3. Дисковый инструмент. К этому классу относятся инструменты, длина которых меньше половины наружного диаметра, имеющие цилиндрические или конические посадочные отверстия: дисковые, пазовые, угловые фрезы, дисковые долбяки, круглые резцы и др. Как и насадной инструмент, их изготавливают цельными, сборными или составными.

4. Плоский или призматический инструмент. К этому классу относятся инструменты, имеющие любую конфигурацию, кроме формы тела вращения: стержневые и призматические резцы, ножи для сборного инструмента, зуборезные и резьбонарезные гребенки, плоские протяжки и др. Инструменты

этого класса также могут быть цельными, сборными или составными [46, с. 3-68].

В работах Розенберга рассмотрены варианты выбора угла деформирующего элемента, предложенные Борисовым и Стрижаком, Перлиным, Альшевским и Колмогоровым. Ни одно из предложенных ими уравнений не подтвердилось результатами опытов [73]. Наиболее близко к опытной кривой при больших деформациях (операции упрочнения) расположена кривая, построенная по уравнению Проскурякова. Экспериментально им полученный график влияния угла рабочего конуса на осевую силу наглядно демонстрирует, что с уменьшением деформации влияние угла становится менее существенным и при деформации равной 0,05 и до 0,1 мм им можно пренебречь. По исследованиям процесса деформирующего протягивания оптимальным принято считать угол рабочего конуса деформирующего элемента равный 4 градусам.

Если принять угол $\varphi = 4^0$, то рабочий конус выглаживающего элемента будет максимально приближен к форме традиционных инструментов для выглаживания или раскатывания.

Выбор диаметра конца режущей части развертки на конце и на цилиндрическом элементе калибрующей части основывается на нескольких факторах. Это включает разбивание отверстия во время обработки, допуск на изготовление отверстия и стремление максимизировать запас на износ развертки по диаметру. На рисунке 3.1 представлена схема расположения полей допусков на диаметр инструмента. Эта схема иллюстрирует ситуацию, когда в процессе развертывания диаметр отверстия увеличивается по сравнению с фактическими размерами развертки. В этом контексте, чтобы получить отверстие, которое находится в пределах поля допуска, максимальный диаметр развертки должен быть равен максимальному диаметру отверстия минус максимальное разбивание. При выборе допуска на диаметр развертки необходимо учитывать то, что допуск возможно обеспечить на станках шлифовальной группы и доводочных станках без сложностей.

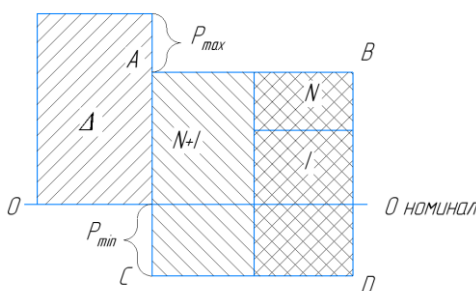


Рисунок 3.1 – Поле допуска на диаметр развертки

Количество зубьев развертки определяется на основе типа обрабатываемого материала, диаметра и дизайна разверток. При увеличении количества зубьев качество обработки отверстий улучшается. Однако это приводит к уменьшению поперечного сечения стружечных канавок, что может

быть недостаточно для свободного размещения и удаления стружки. Если количество зубьев большое и глубина канавок мала, то перешлифовка разверток на меньшие размеры может стать сложной задачей. Несмотря на то, что при операции шлифования удаляются лишь небольшие верхние слои металла, развертки обычно имеют относительно небольшое количество зубьев - от 4 до 14 для машинных разверток. Для сборных разверток это число еще меньше, поскольку вставные элементы требуют дополнительного пространства для крепления.

Как правило у сборной развертки принимают четное количество режущих зубьев, что облегчает проведение измерения её диаметра и положительно влияет на работу данного инструмента, оказывает неравномерное распределение режущих зубьев по всей окружности осевого инструмента, что в свою очередь гасит вибрации возникающих при резании на станке, при условии недостаточной жесткости СПИД, и увеличению чистоты обработанной поверхности [47, с. 3-390].

Основным технологическим документом для мелкосерийного и среднесерийного производств, наиболее характерных для изготовления инструмента, является маршрутное описание технологического процесса, фиксируемое в маршрутной карте (Приложение Д).

Сначала определяют метод окончательной обработки, обеспечивающий требования чертежа по каждой поверхности, а затем начинают выбирать промежуточные методы обработки.

Чем точнее должна быть обработана поверхность (кроме базовой), тем позже ее получают. Согласно практике механической обработки, каждая последующая операция может повысить точность поверхности на 1...3 качества, причем при чистовой обработке это повышение возможно на меньшее число качествен, чем при черновой.

Полученный маршрут является предварительным, так как учитывает только операции механической обработки. Для составления окончательного технологического маршрута необходимо ввести еще такие операции, как контроль, мойка, упаковка, наладка станка с ЧПУ и т. п.

При составлении технологического маршрута определяют тип станка для каждой операции. На последующем этапе проектирования при разработке операционной технологии принятые решения корректируют, уточняют конкретные модели станков.

Маршрутная карта — это документ, который содержит полное описание технологического процесса. Он включает в себя список и содержание операций, информацию об оборудовании и оснастке, а также контроль и перемещение по всем операциям в технологической последовательности. В нем также указываются данные о материальных и трудовых нормативах (Приложение Е). Все эти элементы заносятся в маршрутную карту.

При изготовлении сборного и составного РИ, в том числе с использованием сварки и пайки, технологический маршрут составляется отдельно на каждую деталь и на сборочную единицу со своей нумерацией

операций [46, с. 250]. Ниже на рисунках 3.2, 3.3, 3.4 даны примеры элементов выглаживания поверхности.

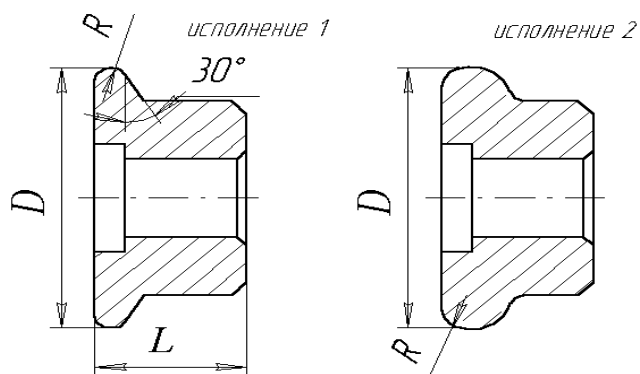


Рисунок 3.2 – Ролики для упрочняющей обкатки поверхностей (по ГОСТ16344)

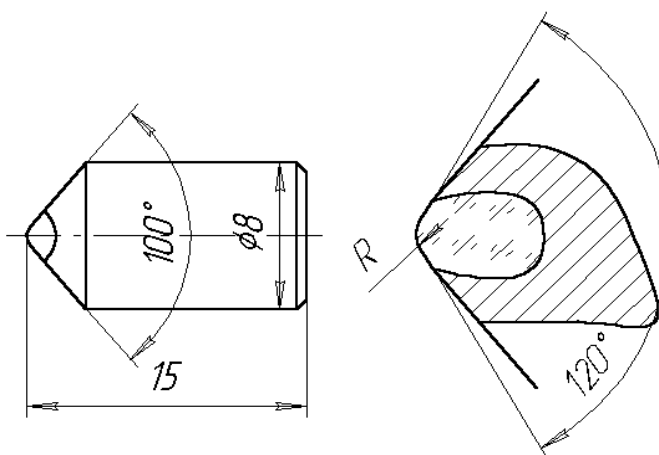


Рисунок 3.3 – Алмазный наконечник для выглаживания поверхностей

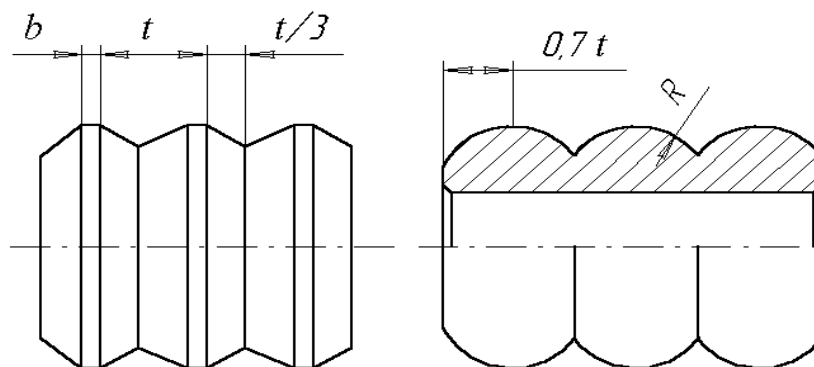


Рисунок 3.4 – Деформирующие части протяжек

Идеальная форма для выглаживающего инструмента максимально приближена к радиусной. Однако, главным недостатком этой конструкции является сложность при производстве. Угол рабочего конуса деформирующего элемента не оказывает значительного влияния на шероховатость, но способствует формированию благоприятных микронеровностей с точки зрения эксплуатации.

Использование системы автоматизированного проектирования КОМПАС позволяет создать технологичную конструкцию деформирующего элемента максимально приближенного к оптимальной форме. Наличие в программе геометрического калькулятора сокращает время на проектирование, а расширенные возможности оператора редактирования делают процесс разработки универсальным.

Повышение температуры закалки ведет к увеличению твердости, но также вызывает рост зерна и карбидов, что, в свою очередь, снижает прочность. В процессе закалки структура стали ШХ15 формируется из мартенсита и остаточного аустенита. Аустенит способствует улучшению вязкости стали, а при его большом содержании уменьшаются закалочные напряжения, что снижает риск выкрашивания и повышает износостойкость. Однако, несмотря на эти положительные эффекты, увеличение содержания аустенита (6-8%) приводит к ухудшению некоторых характеристик закаленной стали: твердость снижается; сопротивление пластической деформации при эксплуатации уменьшается; предел текучести и предел упругости снижаются пропорционально увеличению содержания аустенита (примерно на 5 кгс/мм² на каждый 1% аустенита); прочность снижается на 2-3 кгс/мм² на каждый 1% аустенита (при этом отрицательное влияние аустенита проявляется лишь при его содержании свыше 10-15%); стабильность размеров детали снижается, так как в процессе эксплуатации при дальнейшем самопроизвольном превращении аустенита в мартенсит размеры шариков увеличиваются, что может привести к их пластической деформации и разрушению. Поэтому целесообразно стремиться к снижению количества остаточного аустенита до 6-8%.

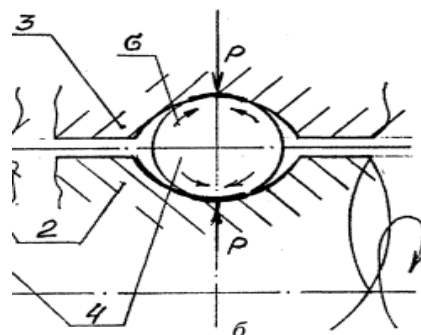
Можно уменьшить количество остаточного аустенита, используя поверхностную обработку вращающихся тел (шариков). Это достигается путем приложения силы к шарикам, что вызывает упругую деформацию, и одновременного их перекатывания по инструменту, деформирующему их по сложной траектории. Это создает образ знакопеременных напряжений в теле обрабатываемой детали цилиндрической формы. В процессе этого происходит декомпозиция оставшегося аустенита, и на поверхности образуются дополнительные сжимающие напряжения, аналогично тому, что происходит при поверхностной пластической деформации (ППД). В самом деле, при ППД закаленной стали ШХ структура поверхностного слоя обрабатываемых деталей меняется. Обработка закаленной поверхности с помощью шариков или алмазного выглаживания приводит к увеличению плотности дислокаций и уменьшению размера блоков, хотя и на относительно небольшую глубину. Интенсивная обработка, вызывающая поверхностную деформацию, приводит к аустенитно-мартенситному превращению, что в свою очередь снижает содержание остаточного аустенита в стали ШХ до 4,5-6,0%. Однако, схема обработки деталей ППД предполагает поверхностное силовое воздействие на ограниченную площадь и влияет только на небольшую глубину, что приводит к упрочнению только поверхности деталей. В основном ППД используется как финальная операция и с целью увеличения износостойкости деталей. Чтобы

увеличить прочность тел качения подшипников, необходимо воздействовать на всю массу металла.

Решение этой задачи возможно, например, при обкатке шариков и их сжатии по диаметру силой, вызывающей упругую деформацию в диаметральном сечении по линии касания инструмента и растягивающие напряжения в перпендикулярном сечении, что позволит создать перемещающееся поле сжимающих и растягивающих напряжений во всем объеме шарика. Путем постоянного изменения положения шарика по отношению к инструменту и многократного выполнения такой обработки, можно достичь распада остаточного аустенита во всем объеме шара и создать сжимающие напряжения на его поверхности. В результате такого метода обработки диапазон вариации значений прочности значительно уменьшается.

В работе А.В. Алифанова и др. «Технология и инструмент для упрочнения деталей сферической формы методом обкатки», была выполнена обкатка шариками, которые используются в шарикоподшипниках, после термической обработки в области упругих деформаций или с небольшой поверхностной пластической деформацией перед предпоследней отделочной операцией – шлифовкой. В процессе вращения комбинированного инструмента шар перемещается на обрабатываемой поверхности по спиральной канавке.

По схеме обкатки показанной на рисунке 3.5 видно, что в перпендикулярном создаются растягивающие, и в радиальном направлении сжимающие напряжения [48, с. 151-152].



1 – место контакта инструмента шарика и детали; 2 – вращающееся тело инструмента; 3 – деталь; 4 – раскатной шарик

Рисунок 3.5 – Схема обкатки шарика

Шарикоподшипниковая сталь ШХ, подвергается отжигу для получения зернистого перлита, который оказывает влияние на свойства стали в изделиях. Отжиг служит подготовительным этапом для последующей закалки. Если исходная структура содержит мелкозернистый перлит, то после закалки можно получить структуру мелкозернистого мартенсита, насыщенного углеродом и хромом, что в конечном итоге определяет долговечность деталей подшипников. Прочность шариков уменьшается при наличии микропористости, определенного расположения различных типов включений, различий в микроструктуре и наличии остаточного аустенита. Для сталей с мартенситной

структурой и твердостью более 50 HRC не наблюдается прямой зависимости между твердостью и прочностью [49, с. 3-580], увеличение твердости важно для повышения устойчивости к износу, продолжительности службы, улучшения качества поверхности при отделке. Повышение твердости, достигаемое за счет увеличения температуры закалки, ведет к увеличению размера зерна и карбидов, что, в свою очередь, приводит к снижению прочности. При закалке структура стали ШХ образуется из мартенсита и остаточного аустенита. Аустенит способствует увеличению вязкости стали, и при большом содержании остаточного аустенита наблюдается снижение закалочных напряжений. Благодаря повышению вязкости уменьшается риск выкрашивания, что ведет к увеличению износостойкости. Можно снизить количество остаточного аустенита, используя поверхностную обработку вращающихся тел (шариков), подвергая их нагрузке, вызывающей упругую деформацию, и одновременно перекачивая их по инструменту, деформирующему по сложной траектории. Это создает образец переменных напряжений в теле обрабатываемой детали. Для увеличения прочности тел качения подшипников необходимо воздействовать на всю массу металла [50, с. 3-420].

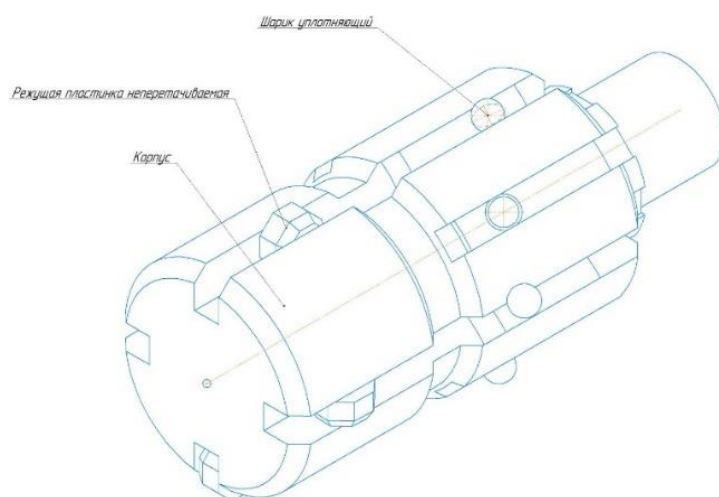
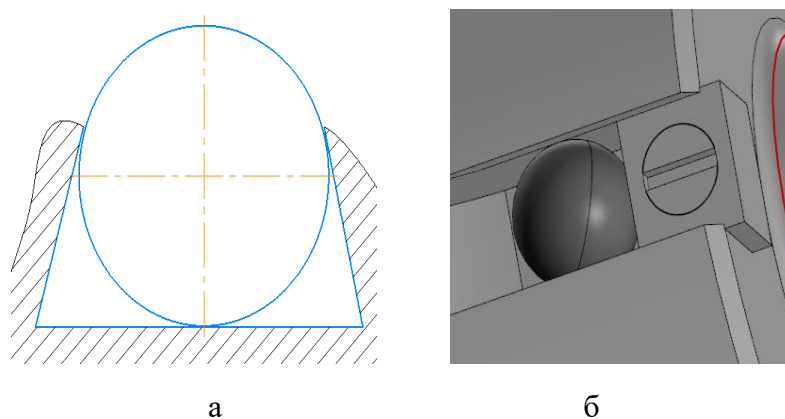


Рисунок 3.6 – Общий вид комбинированной развертки



а – форма посадочного места для шарика; б – метод закрепления раскатных шариков

Рисунок 3.7 – Расположение раскатных элементов

В соответствии с рисунками 3.6, 3.7, для закрепления шариков используем патент на полезную модель РК №7082 от 12.01.2022 г. Берикбаевой М.А. и применим закрепление в пазах специальной формы с последующим утягивающим элементом, согласно сборочному чертежу в приложении.

Полезная модель относится к металлообрабатывающим инструментам и служит для обработки глубоких внутренних цилиндрических отверстий в гидроцилиндрах. Комбинированная развертка представляет собой комбинацию из двух инструментов: традиционной классической развертки и шарикового дорна для окончательного оформления внутренней поверхности отверстия. Режущая часть комбинированного инструмента представляет собой цилиндрическую развертку с короткими режущими кромками на неперетачиваемых пластинах режущей керамики. Калибрующая часть представляет собой инструмент для пластического деформирования схожий с шариковым дорном. Отличительной особенностью является расположение выглаживающих шариков по винтовой направляющей и с разной высотой установки [51, с. 3-150; 52, р. 681-685; 53, р. 1000216; 54, с. 3-910; 55, с. 3-150; 56, с. 3-900].

Комбинированная развертка для обработки внутренней поверхности гидроцилиндров *отличается от аналогов тем, что* упрочняющие элемента – шарики, помимо расположения по винтовой, имеют разницу по высоте вылета и это обеспечивает минимальные нагрузки на каждый отдельный элемент, но дает суммарную глубину упрочненного слоя в пределах 0,8-1,2 мм, в зависимости от номинального диаметра отверстия.

Используя полученную форму инструмента как эскиз в системе автоматизированного трехмерного твердотельного проектирования КОМПАС – 3D была получена виртуальная модель развертки с (рисунок 3.8).

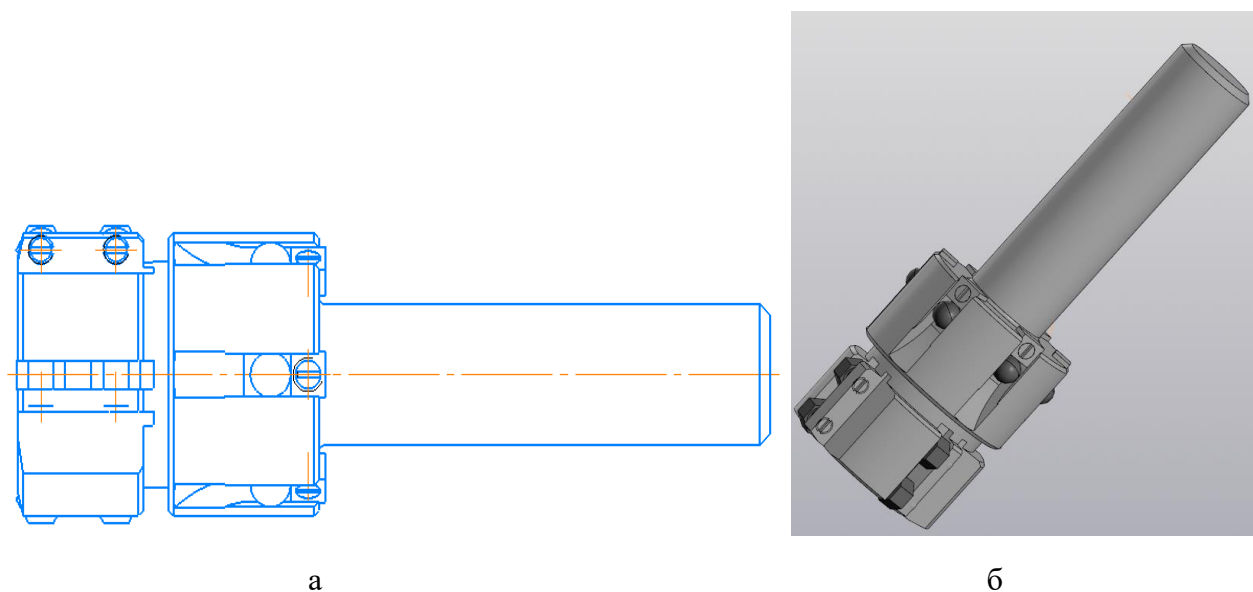


Рисунок 3.8 – Комбинированная развертка

Методика проектирования (или дерево построения) при трехмерном твердотельном проектировании аналогична технологическому процессу изготовления детали, что позволяет говорить о технологичности созданной конструкции. Создание сборочной конструкции определяет положение основных элементов и наглядно показывает весь инструмент [59, с. 3-296]

3.2 Экспериментальные исследования влияния натяга на качество поверхностного слоя

Качественные зависимости дают общее представление о взаимовлиянии факторов при комбинированной обработке. Для проверки теоретических положений и получения количественных значений проводился однофакторный эксперимент по выявлению влияния натяга на качественные показатели поверхностного слоя при комбинированной обработке [60, с. 3-560; 61, с. 3-638; 62, с. 3-780].

Для исследования использовались составные образцы, имеющие осевую линию разъема. Контроль полученных качественных параметров поверхностного слоя осуществлялся многофункциональным прибором, микротвердомером МЕТ, изменение структуры и глубина наклепа фиксировались металлографическим исследовательским микроскопом МИМ-10.

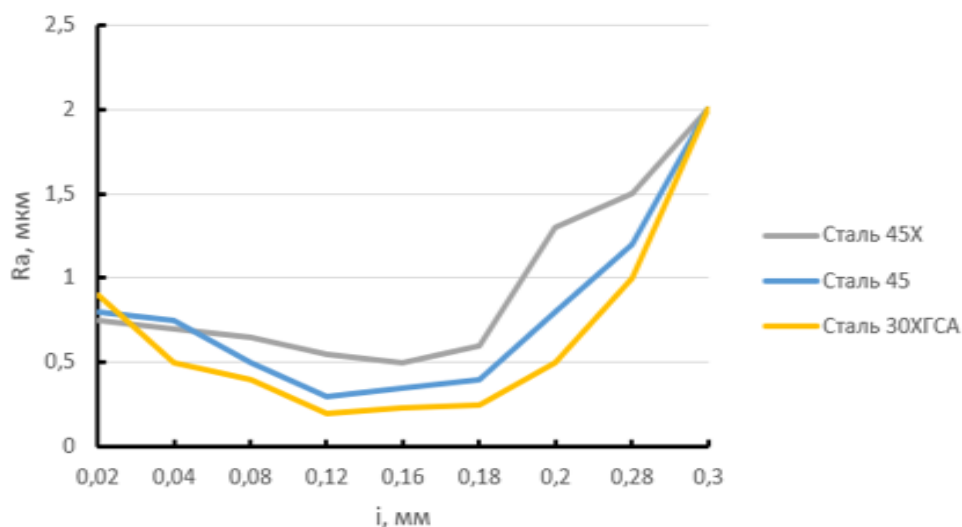


Рисунок 3.9 – Влияние абсолютного натяга на параметр шероховатости

Было выявлено, что с увеличением натяга параметр шероховатости уменьшается до определенного предела (рисунок 3.9). При большом натяге инструмента при раскатывании происходит налипание мелких металлических частиц обрабатываемого материала на комбинированный инструмент (раскатную часть) и в результате изменение шероховатости в сторону увеличения. Упрочнение поверхностного слоя достигнув определенного значения значительного изменения не имеет (рисунок 3.10).

Исследования и большое количество экспериментов у Розенберга А.М., Розенберга О.А., Монченко В.П., Проскурякова Ю.Г. и др. дают достаточно

полное представление о влиянии натяга при поверхностном пластическом деформировании на шероховатость обработанной поверхности.

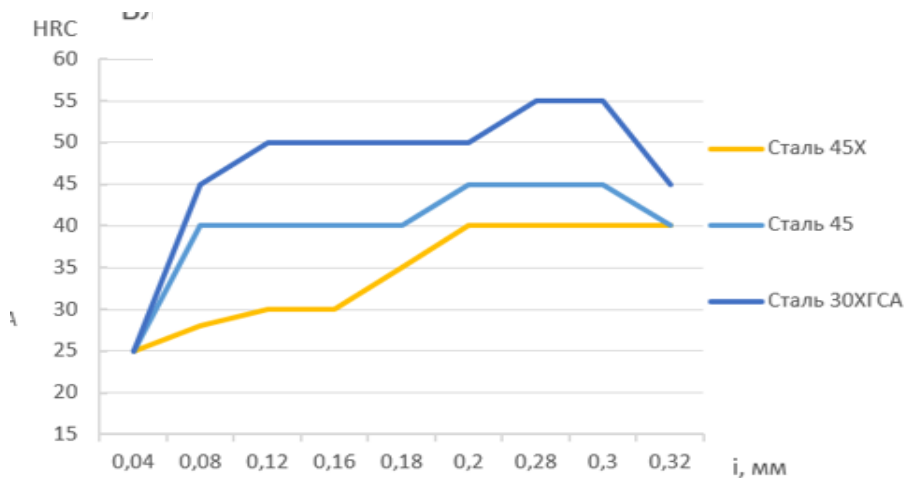


Рисунок 3.10 – Влияние натяга на изменение микротвердости

При раскатывании и обкатывании натяг рекомендуется выбирать $i = 0,03 - 0,35$ мм с анализом текущей и получаемой шероховатости Ra в мкм, точности получаемой детали и диаметра обрабатываемой гладкой цилиндрической поверхности и жесткости инструмента при обработке без направляющей для обработки глубоких отверстий [65, с. 3-460; 66, с. 3-330; 67, с. 3-580; 68, с. 3-320].

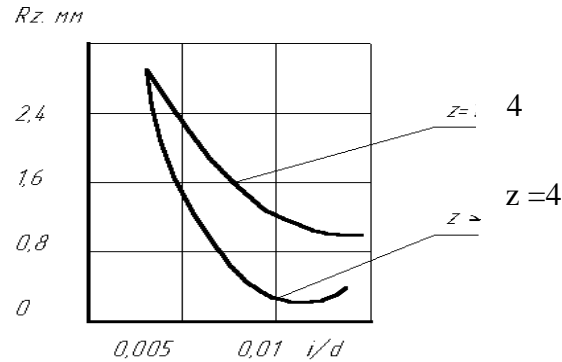
Оптимальным является неравномерное распределение натяга между элементами развертки: 0,1; 0,07; 0,04; 0,03; 0,01 мм. Неравномерный подъем на шар снижает параметр шероховатости. Суммарный натяг при ППД отверстий диаметром до 80 мм обычно составляет 0,1-0,25 мм [47, с. 134].

Как показывают исследования, натяг необходимо выбирать с учетом исходного параметра обработки [50, с. 151]. С ростом натяга при обработке шероховатость сначала снижается, но после достижения предельного значения улучшение качества обрабатываемой поверхности возможно только при наличии высоких пиков неровностей на поверхности при начальных значениях. Если черновая обработка была выполнена качественно, то дальнейшее улучшение качества не наблюдается. Следовательно, выбранный нами параметр предварительной обработки $Rz = 12,5$ ($Ra = 3,2$ мкм) обеспечит необходимое качество с позиции оптимальных эксплуатационных характеристик [69, с. 3-58; 70, с. 3-240; 71, с. 3-248; 72, с. 3-160; 73; 74, с. 528-536; 75, с. 111].

Сила почти пропорциональна относительному натягу (больше натяг, больше требуется усилий) при однозубой обработке. При многозубой обработке сила в определенный момент начинает уменьшаться. Это объясняется тем, что пластическая волна металла, образующаяся вследствие дополнительных сдвигов металла, относительно велика, следовательно, затрачивается большая работа на пластическое деформирование, преодоление

сил трения и поворот участков поверхности (зона неконтактного деформирования). С изменением механических характеристик обрабатываемого материала (особенно предела текучести) сила значительно изменяется [76, с. 3-330; 77, с. 169-174].

Исследования, проведенные Папшевым Д.Д. и многими другими, дают наглядное представление о степени улучшения поверхности в результате обработки ППД (рисунок 3.11).



z – число зубьев инструмента

Рисунок 3.11 – Влияние относительного натяга на параметр шероховатости

Минимальные неровности образуются при оптимальном давлении, обеспечивающем их наибольшую деформацию и зависящем от свойств материала, размеров деформирующего инструмента и состояния исходной поверхности [78, с. 3-150].

При оптимальных значениях нормальной силы исходные неровности полностью выглаживаются. Дальнейшее увеличение силы увеличивает пластические искажения, высота неровностей возрастает, поверхностные слои могут разрушиться и могут появиться трещины.

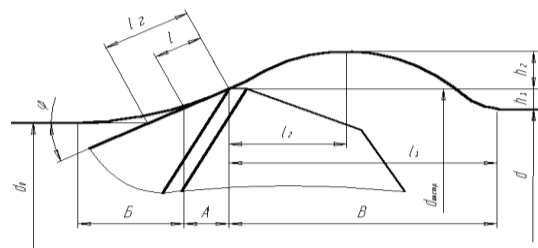


Рисунок 3.12 – Зона контактной и внеконтактной деформации

Очевидно преимущество многозубой обработки (рисунок 3.12). При работе многозубого инструмента натяг распределяется между несколькими деформирующими зубьями; пластическая волна, создаваемая каждым зубом, значительно меньше. Так как поверхностный слой при многозубой обработке упрочнен каждым предыдущим, то работа на упругие деформации металла будет больше, чем при однозубой обработке, однако суммарная работа остается меньшей. Объясняется это снижением параметра шероховатости поверхности,

обработанной предыдущими зубьями, а также созданием ориентированной структуры зерен металла.

Обработка многозубым инструментом с постоянной величиной натяга на каждом элементе (таблица 3.1).

Таблица 3.1 – Зависимость шероховатости обработанной поверхности от натяга на деформирующий элемент и от суммарного натяга

Натяг, мм	$z \cdot i$	0.8	2x0.4	4x0.2	8x0.1	8x0.05
Чистота, мкм	Ra	3.2	0.8	0.37	0.08	0.06

Здесь сказывается влияние повышенного контактного давления, в связи с уменьшением натяга, увеличением числа проходов, упрочнением поверхностного слоя материала [79, с. 1-4].

Если задать не постоянную величину натяга, а постоянное число деформирующих элементов (наш случай), то действовать будет только контактное давление, шероховатость также снизится, но не так существенно (таблица 3.2).

Таблица 3.2 – Зависимость шероховатости обработанной поверхности от постоянного натяга на 4 деформирующих элементов

Натяг (постоянный на 6 элементов), мм	i	0,8	0,4	0,2
Шероховатость, мкм	Ra	0,7	0,4	0,3

Для осевого инструмента – развертки, возможно использование различной величины натяга на каждый деформирующий элемент (зуб). Для нашего случая недостатком такой конструкции инструмента будет являться трудоемкость изготовления, увеличение осевого усилия и сложность вывода инструмента из отверстия. В перспективе этот принцип может быть предметом отдельных исследований [80, с. 3-8; 81, с. 2-4; 83, с. 1-6].

Деформация в контактной зоне сопровождается адгезионными явлениями, которые могут изменяться от незначительных до интенсивных, приводящих к схватыванию поверхностей изделия и инструмента. Изменения адгезионных явлений и контактных давлений влияют на процесс и коэффициенты трения, предопределяя значительные их изменения в зависимости от параметров процесса деформирования.

Каждый зуб производит работу деформирования по уже упрочненному, деформированному предыдущим зубом поверхностному слою, находящемуся в напряженном состоянии. Это необходимо учитывать при определении параметров обработки [85, р. 014501-1-014501-8].

После прохождения каждого зуба образуется волна деформированной поверхности, называемой зоной внеконтактной деформации. Путем регламентирования размеров зубьев и осевого расстояния между ними можно до определенной степени совместить зоны внеконтактного деформирования

соседних зубьев и тем самым снизить работу по изгибу стенок заготовки, повысить точность обрабатываемого отверстия и улучшить другие условия ППД [88, с. 5-7]:

- А – зона контакта;
- Б – зона внеконтактной деформации перед деформирующим элементом;
- В – зона внеконтактной деформации после деформирующего элемента;
- l_2 – теоретическая ширина контакта, $l_2 = i/2\sin\varphi$;
- l – фактическая ширина контакта;
- i – натяг, $i = d_o - d_{инстр}$.

В зоне А приложены действующие силы: P_n - нормальная, P_t - сила трения, P_o - осевая сила, P_r - радиальная сила, η - угол трения.

Зона Б определяет действительную ширину контакта l , если бы зоны Б не было, то ширина контакта $l_2 = i/2\sin\varphi$, где i - натяг. Обычно действительная ширина контакта меньше геометрической, но в исключительных случаях бывают и обратные соотношения вследствие образования валика металла перед деформирующим элементом.

Зона В лишает контакта цилиндрическую часть деформирующего элемента с обрабатываемым материалом, а также определяет величину диаметра обрабатываемого отверстия. После прохода деформирующего элемента, материал обработанной детали разгружается от упругой деформации, которая сопровождается пластической (при разгрузке диаметр отверстия уменьшается). Если величина упругой разгрузки больше удвоенной высоты волны внеконтактной деформации $2h_2$, то диаметр отверстия окажется меньше диаметра деформирующего элемента, произойдет усадка. При больших натягах удвоенная высота волны $2h_2$, бывает больше величины упругой разгрузки, в этом случае происходит «разбивка» [89, с. 35; 90, р. 474-482].

Экспериментально построенная картинка [91, с. 3-380] взаимодействия деформирующего элемента с обрабатываемой поверхностью позволяет предположить, что в точке касания заготовки и поверхности рабочего конуса деформирующего элемента контактное давление равно нулю. На очень коротком участке контактное давление быстро возрастает от нуля до некоторого значения, соответствующего концу зоны упругой деформации металла втулки. Затем в зоне пластической деформации наблюдается незначительное повышение в результате упрочнения металла. Затем контакт прекращается, и контактное давление падает до нуля. Поэтому практически можно считать, что контактное давление некоторой средней величины равномерно распределено по ширине контакта [92, с. 3-200; 93, с. 3-280; 94, с. 161; 95, с. 155; 96, с. 3-140; 97, с. 3-300; 98, с. 3-250; 99, с. 3-400].

Оптимальное значение натяга, влияющее на высоту неровностей, выбирается в зависимости от назначения. В случае упрочняющей обработки, учитывая высоту неровностей предварительной обработки $i_{min} = 2 \cdot Ra = 2 \cdot 10 = 20$ мкм, максимальное значение натяга ограничивается давлением, при котором прекращается пластическое течение металла и начинается разрушение

Новизной решения, предложенного Смелянским В.М., явилось то, что напряженно-деформированное состояние в области деформирования определялось по накопленному значению всей деформации; при этом основным показателем, определяющим упрочнение, степень истощения запаса пластичности металла и остаточные напряжения. Дальнее, на основе базовой модели механики процессов пластического деформирования Смелянского В.М., модель была развита Блюменштейном В.Ю. в направлении учета тензора напряжения [40, с. 6-19].

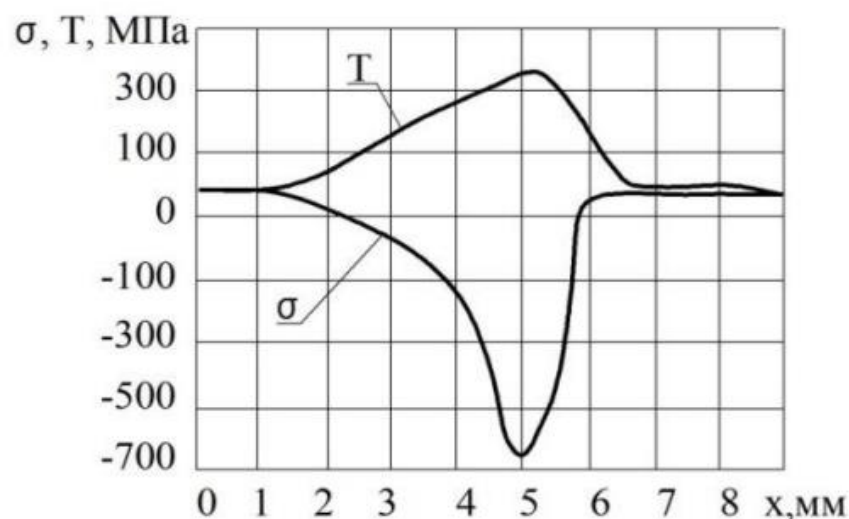
Подходы, разработанные Блюменштейном В.Ю.:

- концепция механики ТН, представленная в виде информационной системы, основанной на обобщении, анализе, систематизации, учете информации о качестве ПС деталей машин и описанной в терминологии 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 остаточных деформаций и уменьшение запаса пластичности материала по стадиям и этапам с учетом сложного 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 торковым роликом усилием наибольшее количество металла ОД находится при сжатом состоянии, при этом, большее значение среднего напряжения (σ) соответствует месту и плоскости контакта комбинированного инструмента и детали (рисунок 3.13). 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 [101; 102, с. 1-2].



τ – интенсивность касательных напряжений; σ – среднее нормальное напряжение

Рисунок 3.13 – Распределение среднего нормального напряжения и интенсивности касательных напряжений вдоль контура очага деформации после первого рабочего хода

Показано, что перед деформирующим инструментом, в области критических точек у пластической волны, локализуются самые большие значения показателя касательных напряжений (σ). Данная схема нагружения приводит к интенсивному накоплению деформаций в зоне ОД [104, с. 3-268]. Далее, по мере упрочнения слоя поверхности металла, каждый следующий рабочий ход приводит жесткой схеме нагружения, которая приводит к накоплению предельных деформаций и исчерпанию запаса пластичности обрабатываемой зоны материала.

3.3 Исследование влияние подачи на качество поверхности

Изменение подачи и размер деформирующего инструмента может в значительной степени изменить шероховатость обработанной поверхности. Высота неровностей поверхности прямо пропорциональна величине заданной подачи режимов обработки в квадрате и обратно пропорциональна радиусу R деформирующего шара.

Анализ рекомендуемых подач при раскатывании и выглаживании. Подачу при раскатывании назначают не более 0,2 мм/об, при работе шариками с заданной шириной b принимают подачу равной $S=0,3xb$ мм/об; для шероховатости со значением $Ra=0,32$ мкм, полученное значение подачи корректируют при помощи поправочных коэффициентов для расчета [107-109].

Как было рассмотрено в разделе 2 с увеличением величины натяга с 0,03 до 0,15 мм микротвердость поверхностного слоя может увеличиваться до 10%, глубина упрочненного слоя при этом возрастает до 1 мм. Изменение продольной подачи приводит к снижению твердости поверхностного слоя. Увеличение частоты вращения заготовки повышает микротвердость и глубину

упрочненного слоя, что делает поверхность склонной к образованию микротрещин в узлах повышенной концентрации напряжений.

При использовании комбинированной обработки с применением ППД размер зерен в упрочненных слоях уменьшается, увеличение концентрации измельченных твердых зерен обеспечивает повышение микротвердости в поверхностном слое упрочненных цилиндрических деталях [110].

Для комбинированных инструментов, имеющих несколько видов обработки, принимают подачу $S=0,15...3,0$ мм/об. Средняя величина подачи на один элемент режущей части не должна превышать 0,15-0,35 мм/об для развертывания (рисунок 3.14).

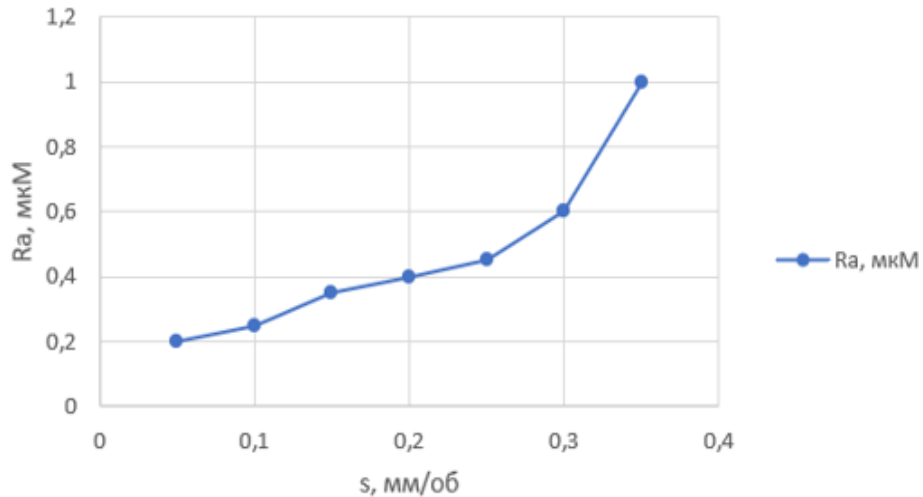


Рисунок 3.14 – Зависимость параметра шероховатости от величины подачи при обработке стали 45

Подача при выглаживании сталей средней твердости составляет 0,02-0,05 мм/об.

Оказывает влияние на шероховатость обработанной поверхности высота неровностей, полученная предварительной обработкой. Следовательно, необходимо выбирать подачу с учетом получения высоты неровностей режущей частью комбинированного инструмента [111].

Прямолинейная режущая кромка имеет угол наклона λ и располагается в плоскости параллельной образующей обрабатываемой поверхности, которая в этом случае представляет собой винтовую поверхность с шагом равным подаче на зуб. Винтовая поверхность имеет криволинейный профиль, гребни которого имеют высоту, определяющую высоту гребешков шероховатости обработанной поверхности и величину отклонения ее от цилиндра. Профиль обработанной поверхности не связан с передним углом режущего зуба, так как образуется винтовым движением прямолинейной режущей кромки (производящая прямая), касательной в точке касания к основному цилиндру радиуса $r_0 = (D + 2t)$.

Тогда, подача, допускаемая критерием Ra

$$S_z \cdot \operatorname{tg} \lambda = \frac{\pi(D+2t)\sqrt{Ra(D+2t)}}{\pi(D+2t)/2 - \sqrt{Ra(D+2t)}} \quad (3.1)$$

Из формулы (3.2) можем определить значение подачи для параметра шероховатости после работы развертки $Ra=1,25\dots3,2$ мкм

$$S = \sqrt{\frac{8R \cdot Ra}{\left(1 - \frac{k-1}{2k}\right) K_e K_p}} \quad (3.3)$$

Задавшись параметрами Ra , D , и t получим $S_z \cdot \operatorname{tg} \lambda$ и, выбрав S , определим оптимальные углы наклона главной режущей кромки, допустимые критерием шероховатости.

Длина рабочей режущей кромки будет определяться

$$l_p = \frac{\sqrt{t(D-t)}}{\sin \lambda} + \frac{S}{2 \cos \lambda} \quad (3.2)$$

Необходимо учесть, что стойкость инструмента с уменьшением угла λ возрастает, также при этом увеличивается допускаемая заданной шероховатостью подача (следовательно и производительность), что положительно, но увеличивается длина режущей кромки (следовательно ширина стружки), что приводит к возникновению вибраций. Увеличение глубины резания также может увеличить вибрации. С этой позиции оптимальными будут углы λ в пределах $10-20^\circ$ по абсолютной величине [112].

Припуск под развертывание по рекомендациям для выправления макронеровностей составляет 0,5 мм для всего диапазона диаметров, шероховатость после развертывания не должна превышать 10 мкм = 0,01 мм.

Параметр шероховатости зависит от числа рабочих режущих кромок инструмента, в основном вся работа выполняется за первый проход и для комбинированных сборных инструментов рекомендуется не более 4. С увеличением числа ходов до двух – трех параметр шероховатости уменьшается, но в меньшей степени, так как повторные рабочие ходы выполняются уже по сглаженной поверхности (таблица 3.3).

Таблица 3.3 – Рекомендуемые режимы обработки

Материал гидроцилиндра	Диаметр отверстия, мм	Растачивание				Развертывание			
		t, мм	S, мм/об	n, мин ⁻¹	V, м/мин	t, мм	S, мм/об	n, мин ⁻¹	V, м/мин
Сталь 45	30	4,5	0,3	250	24	0,5	0,2	200	19
	40	4,5	0,4	250	31	0,5	0,2	200	25
	50	4,5	0,4	250	39	0,5	0,2	160	25
	63	4,5	0,4	250	49	0,5	0,2	160	31
	80	4,5	0,4	250	62	0,5	0,2	125	31

Оптимальное значение подачи для обеспечения шероховатости $Ra = 0,32\dots1,25$ мкм составляет 0,2 – 0,8 мм/об, при $S_z = 0,04 – 0,14$ мм/зуб.

Эффект упрочнения металла при ППД положительно отражается на эксплуатационных характеристиках деталей машин, повышая их износостойкость, контактную прочность, надежность прессовых посадок и др. [113-118].

3.4 Исследования влияния натяга на изменение размеров детали

Теоретическими предпосылками для данных исследований явились результаты анализа работ Розенберга А.М. и Розенберга О.А, Монченко В.П., Проскуракова Ю.Г. по изучению изменения размеров при комбинированной обработке отверстий деформирующими протяжками.

Изменения величины размеров комбинированного инструмента зависят от размеров заготовки и требований чертежа, условий применения инструмента и детали, геометрических параметров режущих и деформирующих элементов, а так же степени деформации поверхностного слоя металла [119]. Результаты опытов приведенных в работах Розенберга расходятся с экспериментальными на $\pm 3\%$. Изменение толщины стенки:

$$t/t_0 = 1,5 - 0,5d/d_0 \quad (3.3)$$

Это уравнение – эмпирическое и не может быть одинаково точным для любого диапазона изменения переменных. Так, при $d/d_0 = 3$ согласно $t/t_0 = 0$, что явно абсурдно. Однако, оно дает высокую точность – до $d/d_0 \leq 1,4$, что вполне достаточно для процесса деформирующего протягивания, так как и такие деформации при этом процессе не применяются.

Имея уравнение, можно перейти к зависимостям, позволяющим рассчитать увеличение наружного диаметра детали $D; D - d = 2t; D_0 - d_0 = 2t_0$. Отсюда

$$\begin{aligned} D - D_0 &= 2(t - t_0) + (d + d_0); \\ D - D_0 &= (d - d_0) \left(1 - \frac{t_0}{d_0} \right) = \Sigma a \left(1 - \frac{t_0}{d_0} \right). \end{aligned} \quad (3.4)$$

Результаты экспериментальной проверки уравнений, с достаточной точностью, подтверждаются экспериментом.

Уравнение с учетом постоянства объема металла при пластическом деформировании позволяет вывести зависимость для расчета длины заготовки L_0 по длине обработанной детали L . Из условия постоянства объема:

$$\frac{L}{L_0} = \frac{d_0 + t_0}{d + t} \frac{t_0}{t}, \quad (3.5)$$

где d_0, t_0 – исходные размеры заготовки;

d, t – размеры после протягивания. Отсюда

$$\frac{L}{L_0} = \frac{1 + \frac{t_0}{d_0}}{\left(1,5 - 0,5 \frac{d}{d_0}\right) \left[\frac{d}{d_0} + \frac{t}{d_0} \left(1,5 - 0,5 \frac{d}{d_0}\right) \right]}. \quad (3.6)$$

Уравнение получено на основании экспериментов протягивания отверстий деформирующими элементами с углом рабочего конуса $\alpha = 4^\circ$. Уравнение показывает, что L/L_0 увеличивается с возрастанием t_0/d_0 и уменьшается с ростом d/d_0 . При обычно применяемых в практике отношениях $t_0/d_0 < 0,25$ уравнение показывает укорочение заготовки при протягивании ($L/L_0 < 1$), что подтверждается экспериментально. Если далее увеличивать t_0/d_0 , то в соответствии с уравнением можно получить $L/L_0 > 1$, т.е. длина обработанной детали будет больше длины заготовки L_0 . Для $\alpha = 4^\circ$ эта закономерность опытом не проверена, так как t_0/d_0 выходит за пределы применяемых значений. Однако дальше показано, что она соответствует действительности. В работе [66, с. 3-330] приведены результаты расчетов по формуле для трех значений $t_0/d_0 - 0,07; 0,13; 0,26$, а также результаты опытов по пяти различным металлам – Л62, стали 45, армко-железа, 38ХМЮА и У8А. Экспериментальные точки хорошо соответствуют расчетным кривым в широком диапазоне изменений t_0/d_0 и d/d_0 . Приведенные данные показывают, что материал детали заметного влияния на размеры не оказывает и укладывается в область разброса экспериментальных точек [119, с. 3-190].

Значения t/t_0 , $D-D_0$, L_0/L мало зависят от обрабатываемого материала. Натяг на деформирующий элемент также не влияет на эти параметры, в то время как степень деформации втулки и отношение толщины стенки к диаметру значительно влияют на эти величины. Разработаны зависимости для расчета упругого восстановления детали, определения диаметра её отверстия после пластического деформирования с учетом влияния внеконтактной деформации и упругого восстановления. Абсолютная величина упругого восстановления при деформирующем протягивании возрастает с увеличением диаметра отверстия, прочности обрабатываемого металла, повышением накопленной деформации и уменьшается с увеличением толщины стенки детали и модуля упругости металла детали. От величины натягов, в результате которых получена суммарная деформация, упругое восстановление не зависит.

В процессе ППД для отверстий в деталях, таких как втулки и трубы, происходит изменение всех размеров заготовки: диаметры отверстия и наружные увеличиваются, стенка становится тоньше, а длина меняется. Данные изменения во многом зависят от параметров исходной заготовки, условий обработки инструментом и детали, геометрических параметров

деформирующих шариков и степени деформации основной детали. Установлено, что в каждом конкретном случае шелушение наступает после примерно постоянного числа циклов деформации, которое зависит от толщины стенки и твердости металла НВ. Исследование тонкой структуры поверхностного слоя в работах Розенберга, показало, что при деформациях, предшествующих шелушению, происходит перестройка хаотически распределенных дислокационных скоплений в четко выраженную мелкоячеистую структуру с достаточно высокой плотностью дислокаций во внутренних зонах ячеек. К моменту начала шелушения ячейки вытягиваются, создавая ярко выраженную текстуру. В следующие циклы деформации степень текстурированности растет (рисунки 3.15, 3.16).

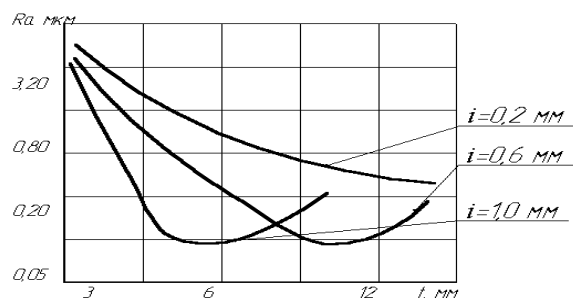


Рисунок 3.15 – Зависимость шероховатости обработанной поверхности от толщины стенки

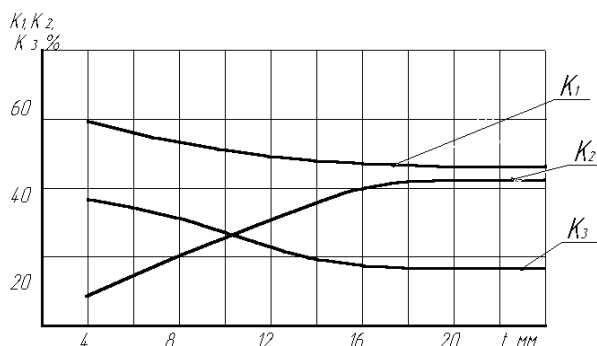


Рисунок 3.16 – Зависимость работ раздачи, трения и изгиба от толщины стенки при обработке втулок из стали 45 диаметром 50

С увеличением толщины стенки доля работы трения снижается, поскольку при этом возрастает контактное давление и уменьшается коэффициент трения.

При увеличении толщины стенки, при постоянных диаметре и натяге, средняя степень деформации уменьшается; снижаются упрочнение и сопротивление изгибу. Поэтому работа изгиба растет медленнее момента сопротивления. Аналогичные явления происходят при увеличении диаметра. Работу трения можно значительно уменьшить снижением коэффициента трения, что в свою очередь, достигается улучшением технологической смазки, а также повышением контактного давления.. Контактные давления можно

повысить таким расположением деформирующих зубьев, при котором они оказываются связанными между собой общими зонами внеконтактных деформаций.

Исследования некоторых авторов, которые стремились теоретически вывести уравнения для расчета изменений размеров обрабатываемых деталей при ППД, не дали окончательно точных результатов и показали значительные отклонения от размеров, полученных на практике [120-123].

В случае обработки гильз цилиндров и труб с $D_0/d_0 = 1,2$ шероховатость поверхности достигает необходимой величины при оптимальных режимах обработки. Увеличение жесткости детали уменьшает деформацию до появления шелушения. Комбинированная обработка создает в поверхностном слое упрочнение, а также повышает физические и механические характеристики верхнего слоя материала детали, оказывая благоприятное действие при эксплуатации гидроцилиндра. Поверхностная деформация по величине стенки цилиндрической гильзы распределяется достаточно неравномерно из-за того, что у механически обработанной поверхности в процессе взаимодействия поверхностей инструмента и детали создается неглубокий слой текстуры с высокой деформацией, а также повышенным поверхностным упрочнением.

Толщина упрочненного слоя с увеличенной твердостью на поверхностном слое зависит от величины натяга при подаче комбинированного инструмента, вида СОЖ, марки материала детали (легированная, углеродистая, высоколегированная и т.д.) и размера толщины стенки цилиндрической детали.

При проведении анализа полученных данных для режимов обработки при влияния натяга на деформацию поверхности заготовки применялись трубы с разной толщиной стенки и разным материалом. Результат полученных данных для эксперимента показан на рисунке 3.17.

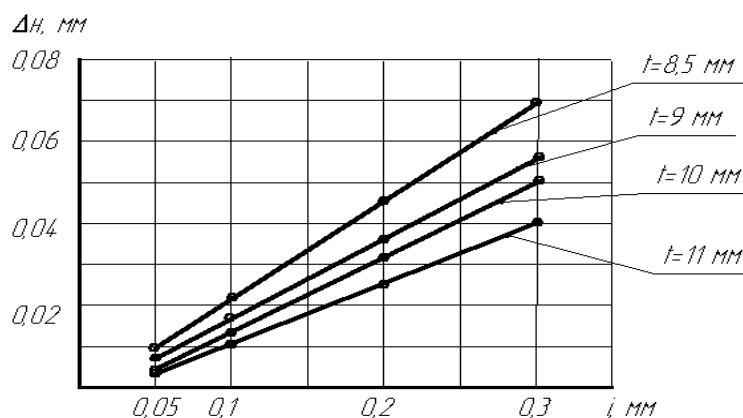


Рисунок 3.17 – Влияние натяга на характеристику обработки

Экспериментальные исследования влияния натяга на увеличение наружного диаметра приведены в таблицах 3.4, 3.5.

Таблица 3.4 – Влияние параметра натяга на изменение диаметра цилиндра

i, мм	ΔH , мм			
	t = 8,5 мм	t = 9 мм	t = 10 мм	t = 11 мм
0,05	0,01	0,008	0,006	0,004
0,1	0,025	0,02	0,015	0,013
0,2	0,045	0,035	0,03	0,028
0,3	0,07	0,055	0,05	0,04
0,4	0,085	0,07	0,06	0,055

Таблица 3.5 – Значения установленного коэффициента для деталей типа вал

Толщина стенки t, мм	11	10	9	8,5
Значение коэффициента a	0,1333	0,1666	0,1833	0,2333

В ходе проведенного эксперимента получен ряд однотипных и схожих характеристик. Подводя итог аналитического построения полученных данных определено, что отклонение от средней величины основной полученной характеристики составляет 1,5...2%, что дает нам право ввести поправочный

$$\frac{\Delta H}{i}$$

коэффициент a, – изменения размера. $tg a = i$

Как можно заметить, внешний диаметр прямо зависит от натяжения. Коэффициент «a» определяется функцией толщины, поэтому целью была установление связи между этим коэффициентом и толщиной обрабатываемой стенки детали (рисунок 3.18). С этой целью необходимо вывести аналитическую формулу, показывающую зависимость основной толщины обрабатываемой стенки от коэффициента изменения её предельного размера [124].

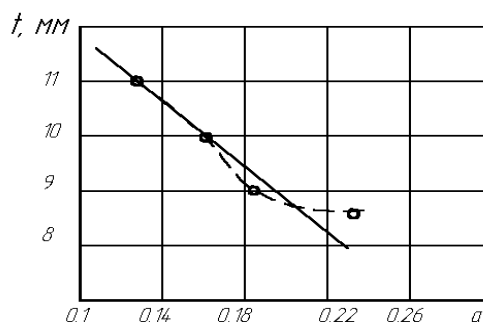


Рисунок 3.18 – Определение аналитической зависимости толщины стенки от коэффициента изменения размера

Использовался метод наименьших значений величин квадратов, который применяется при обработке основных статистических данных при эксперименте и базирующийся на минимизации дисперсии полученных данных

Величина толщины стенки формула (3.7):

$$t = \frac{1}{0,422a + 0.036} \quad (3.7)$$

В этом случае, для определения величины натяга для обработки, возможно изменение величины наружного диаметра обрабатываемого инструмента формула (3.8):

$$i = \frac{0,422 \cdot \Delta_n \cdot t}{1 - 0.036 \cdot t} \quad (3.8)$$

Полученная зависимость возможна для применения исключительно для деталей с отношением диаметров $D_0/d_0 \leq 1.5$. Апробация полученной зависимости проведена на нескольких полученных контрольных точках, а так же точках, которые не вошли в проведенный эксперимент. Результатом стало отличие полученных данных, не превышающее пороговое значение в 3,5%.

Непостоянство механических свойств материала изделий может оказать наибольшее влияние на величину случайной погрешности при комбинированной обработке. Как пример, необходимо привести колебания предела текучести для партии стальных заготовок $T(\sigma_T) = 200$ МПа при внутреннем диаметре $d_0 = 50$ мм, $E = 2 \cdot 10^5$ МПа могут привести к образованию

случайной погрешности для операции $\frac{d_0}{E} T(\sigma_T) = 40$ мкм. В результате, для увеличения точности предлагаем ввести предварительную термообработку, которая обеспечит постоянные механические свойства металла [70, с. 3-240; 71, с. 3-248; 72, с. 3-160; 73; 74, с. 528-536].

Из-за разных условий пластической деформации, диаметр отверстий в цилиндрах, находящихся на расстоянии 2,5...3 мм от торца, отличается на 0,025...0,15 мм от диаметра в остальной части цилиндра. У деталей с толстыми стенками диаметр увеличивается, а у деталей с тонкими стенками – уменьшается [125]. Поэтому предлагается изготавливать длинные заготовки, которые затем можно разделить на отдельные детали.

3.5 Моделирование комбинированного инструмента

Проектирование методики комбинированного процесса для обработки цилиндрических гладких отверстий необходимо выполнять в заданной технологической последовательности:

1. Анализ и подбор оборудования.
2. Анализ конструктивных и геометрических параметров используемого инструмента для механической обработки, а так же заданных технических требований.
3. Выбор универсальных станочных приспособлений, которые будут применены для обработки на выбранном металлорежущем оборудовании.
4. Задание припуска под механическую обработку.

5. Назначение параметров и режимов мехобработки обработки для заготовки.

6. Проверка заданных режимов для нормального протекания процесса.

7. Определение штучного и машинного времени технологического процесса.

8. Расчет технико-экономических показателей.

Основные конструктивные параметры инструмента определяются на основании условий его прочности, жесткости и объема стружки. Оптимальная геометрия режущей части устанавливается или принимается из условий резания.

Ключевые конструктивные параметры комбинированной развертки включают: диаметр, длину, угол заборного конуса, количество зубьев, размеры и форму стружечных канавок, а также геометрию зубьев [72 с. 151]. Диаметр обработанного отверстия после прохождения деформирующего элемента, как правило, определяется по формуле (3.9).

$$d = D_k + 2h_2 - U_d - 2y' \quad (3.9)$$

где D_k – наружный диаметр деформирующего шара, мм;

$2h_2$ – высота волны поверхности при деформации, мм;

U_d – упругое восстановление диаметра отверстия, мм;

$2y'$ – упругое уменьшение диаметра деформирующего элемента, мм.

Диаметр для развертки будет вычислен по формуле (3.10):

$$D_k = d - 2h_2 + U_d \quad (3.10)$$

где d – максимальный диаметр обрабатываемого отверстия.

Высота волны поверхности при деформации h_2 есть функция толщины стенки цилиндра, диаметра деформирующего шара и твердости обрабатываемого материала заготовки [60, с. 3-60].

$$t_{кр} = 3,6 \cdot i^{0,67};$$

$$h_{2B} = 0,122 \cdot t_0^{0,6} \cdot i^{0,55} \cdot D_k^{0,12} \cdot HB^{-0,34}$$

$$h_{2H} = 0,07 \cdot t_0^{-0,6} \cdot i^{0,87} \cdot D_k \cdot HB^{-0,26}$$

Для определения значения упругого восстановления размера диаметра отверстия была получена следующая зависимость [73]:

$$U_d = \frac{d \cdot \sigma_i}{\sqrt{3E}} [K_1^2(1 - \mu) + (1 + \mu)] \quad (3.11)$$

где σ_i – напряжение, определяемое по кривой течения при растяжении образца из обрабатываемого металла, соответствующее суммарной деформации втулки $e_{ср.}$ по среднему диаметру;

E – модуль упругости первого рода обрабатываемого материала, кГ/мм²;

μ – коэффициент Пуассона;

$$K_1 = d/D$$

$$E_{cp.} = \frac{d+t}{d_0+t_0} - 1 \quad (3.12)$$

По уравнению (3.12) диаметр отверстия после прохода деформирующего элемента можно рассчитать только приближенно, поэтому можно воспользоваться таблицами экспериментальных опытов.

Создание системы допусков для развертки считается достаточно сложной задачей, в основном из-за высокой сложности технологического процесса при комбинированной обработке отверстия резанием и раскаткой. Форма, точность и чистота поверхности правильного отверстия зависят не только от развертки, но и от множества других факторов указанных в таблице 3.6.

Таблица 3.6 – Усадка отверстий при различных i и D_0/d_0

i	D_0/d_0						
	1.1	1.2	1,4	1,6	1,7	1,8	2.15
0.05	0.025	0.025	0.03	0.035	0.04	0.04	0,05
0.1	0.03	0.03	0.04	0.04	0.05	0.055	0,06
0.2	0.035	0.035	0.04	0.045	0.055	0.06	0,07
0.3	0.035	0.035	0.04	0.05	0.06	0.07	0,08
0.4	0.04	0.04	0.05	0.055	0.065	0.075	0,09
0.6	0.045	0.045	0.05	0.06	0.07	0.08	0,095

Среди них стоит отметить: размеры отверстия (диаметр, толщина стенки, длина), марка материала заготовки, предварительную черновую и чистовую обработку (запас на развертывание, наличие овальности и т.д.), условия работы при развертывании (режимы резания, СОЖ). Однако главным фактором при разработке технических требований к комбинированной развертке являются требования, которые предъявляются к готовому обработанному отверстию [79, с. 1-4; 80, с. 1-8; 81, с. 1-3; 82, с. 1-6; 83, с. 1-6].

Для нормального протекания процесса допуск на размеры обрабатываемого отверстия δ должен быть в несколько раз меньше половины натяга, определенного по минимальному размеру $i_{max}/2 > 3 \delta$. Допуск на размеры δ_1 образуемого при ППД отверстия (на сторону) обычно меньше δ . Пластическая деформация составляет δ_r или δ_{r1} .

При назначении допуска на диаметр комбинированной развертки применяются основные положения:

- развертка должна обеспечивать возможность большого количества переточек, то есть иметь определенный запас прочности;

- в рамках этого запаса развертка должна обеспечивать получение отверстия, которое соответствует требованиям по точности размера и качеству обработки;

- развертка должна иметь допуск на изготовление и сборку, чтобы его производство не вызывало особых трудностей.

δ_1 – положительная разбивка $= 1/3 \delta T_D$.

В случае обработки вязких, пластичных материалов, не достаточно острой разверткой и при обработке тонкостенных ($h/R < 0.2$) деталей учитывается усадка.

Главная и основная причина разбивки – отсутствие соосности осей шпинделя станка, развертки и предварительно обработанного отверстия. δ_2 – допуск на погрешность изготовления развертки $\delta_2 = 1/3 \delta_A$.

Создание системы допусков включает в себя корректное определение верхнего и нижнего отклонения новой развертки, а также нижнего отклонения изношенной развертки. Особые трудности возникают при определении верхнего отклонения новой развертки. Как и при стандартной обработке отверстий, развертка в процессе работы увеличивает размер отверстия по сравнению с ее фактическим размером.

В связи с этим, чтобы избежать брака, необходимо занизить верхнее отклонение диаметра развертки по отношению к верхним отклонениям её диаметра. Качество поверхности деформирующего раскатного элемента развертки оказывает значительное влияние на шероховатость обработанной поверхности.

Диаметр разрабатываемой развертки на заборном конусе режущей части изготавливается немного меньшим диаметром для обработанного начисто отверстия на 0,25-0,5 мм припуска под лезвийную операцию развертывание. Для обеспечения свободного входа и улучшения первоначального направления развертки в отверстие необходимо соблюдать данное условие. На конечной стадии калибровки диаметр устанавливается немного меньше, чем диаметр на цилиндрической рабочей части инструмента, что приводит к созданию обратного конуса. Этот конус необходим для снижения разбивки, уменьшения трения лент и облегчения извлечения инструмента из отверстия [126-128].

Длина части инструмента развертки с обратной конусностью $l_3 \approx (0,25 \dots 0,5)l_1$. По рекомендациям источников для проектирования режущих инструментов большая длина обратного конуса нежелательна.

Число и направление зубьев.

Для получения большей точности и меньшей шероховатости стремятся к большему числу зубьев.

В случае проектирования комбинированной развертки при выборе числа зубьев следует учитывать длину волны внеконтактной деформации. Для комбинированных, сборных инструментов рекомендуется не более 4.

Высота волны определяется выражением (3.13).

$$\ln h_2 = -3,743 + 1,674a - 0,0162D_K + 0,636(HB) + 0,127at_0 + 0,00504D_K t_0 + 0,0214D_K a - \\ - 0,0395t_0^2 - 0,917a^2 - 0,000228D_K^2 - 0,27(HB)^2 + 0,00364t_0^3 - 0,00708at_0^2 - 0,000486D_K t_0^2 - \\ - 0,0000933t_0^4 + 0,0000157D_K t_0^3$$

расстояние до максимума высоты волны $l_2 = 0,447a^{0,28} \sqrt{t_0 d_0}$;
длина волны

$$\ln l_3 = 2,4 + 0,0805t_0 + 0,0178D_K - 0,404(HB) + 0,00431D_K a + 0,0445a(HB) - 0,00124t_0^2 - 0,0844a^2 - 0,000123D_K^2 + 0,09(HB)^2$$

более простое уравнение $l_3 = 1,34a^{0,218} \sqrt{t_0 d_0}$;

$$R_a = 1,33 \times V^{0,1} \times \lambda^{0,16} \times K_{\text{ППД}}^{-0,04} \quad (3.13)$$

где V – скорость резания, м/мин;

λ – теплопроводность режущего материала, Вт/м*К;

S_o – продольная подача, мм/об;

$K_{\text{ППД}}$ – коэффициент ППД.

Режим деформации поверхностного слоя описывается по формуле (3.14)

$$K_{\text{ППД}} = \frac{h_{\text{нак}}}{t_p} \quad (3.14)$$

где $h_{\text{нак}}$ – глубина наклепанного слоя на поверхности, мм;

t_p – глубина резания материала, мм

Значение факторов коэффициента $K_{\text{ППД}}$ принимаем 1,6 для скорости резания 25 м/мин. Теплопроводность режущего материала для твердосплава от 13 до 38 принимаем 38 Вт/м*К.

Уравнения разработаны для случая обработки отверстий деформирующими элементами с углом наклона образующей рабочего конуса $\alpha = 4^\circ$.

Обычно профиль зубьев развертки трапециевидный. Для увеличения объема стружечных канавок при обработке вязких материалов спинка зуба может делаться вогнутой [124, с. 3-294; 125, с. 3-330; 126, с. 11-18; 127, с. 54-56; 128, с. 53-87].

Режущая часть остро-затачивается (задняя поверхность оформляется по плоскости) с углом равным 15° [129].

Для комбинированной развертки применяется съемная шестигранная пластина по ГОСТ 19081-80 «Пластины опорные сменные многогранные твердосплавные шестигранной формы. Конструкция и размеры»

Результат общего создания комбинированной развертки сведен по разным признакам в ПО при создании и проектировании режущих инструментов для автоматизированного расчета. В итоге последовательность разработки комбинированной развертки можно определить стандартными выводными данными при помощи таблиц (рисунок 3.19), в каждой из которых записаны характеристики для развертки и шариков, и при выборе значений будут отражены необходимые параметры для изготовления.

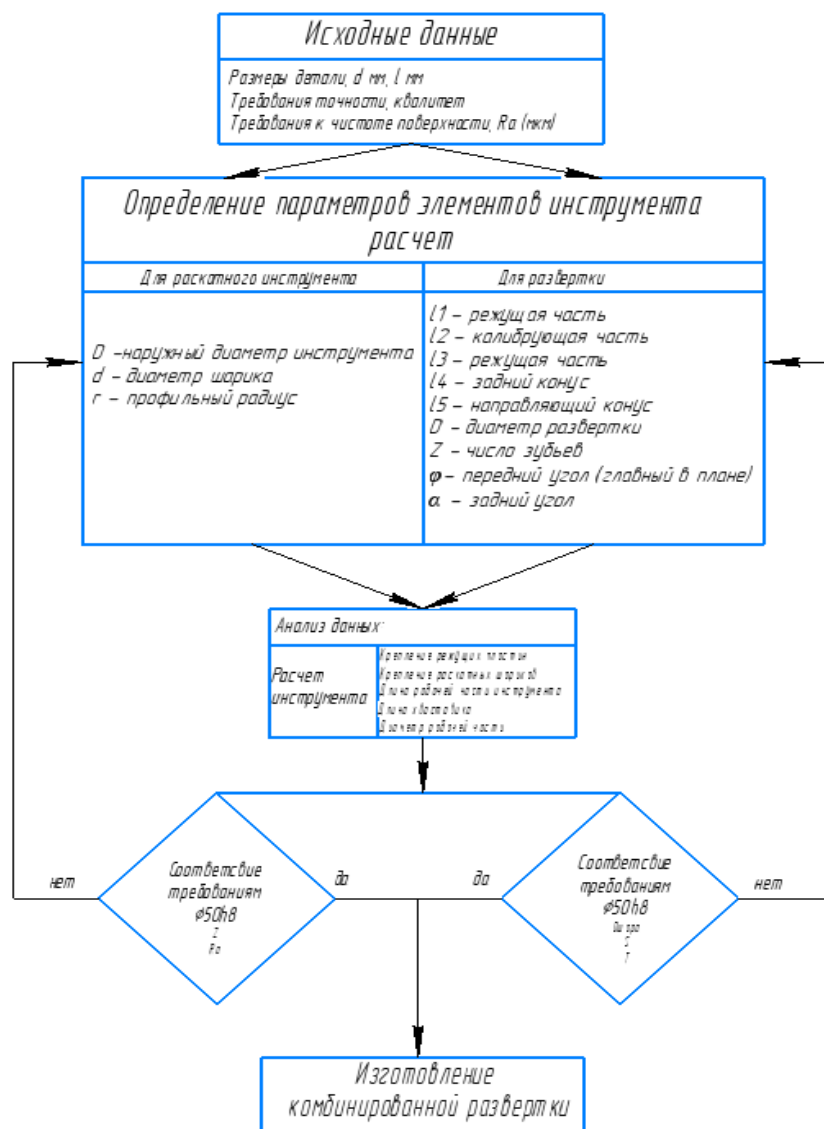


Рисунок 3.19 – Алгоритм разработки комбинированной развертки

Для моделирования комбинированного инструмента использовалась ПО КОМПАС-3D, в котором определена последовательность сборки составляющих элементов комбинированной развёртки [130], выполнено наглядное изображение модели и крепления рабочих частей (рисунок 3.20).

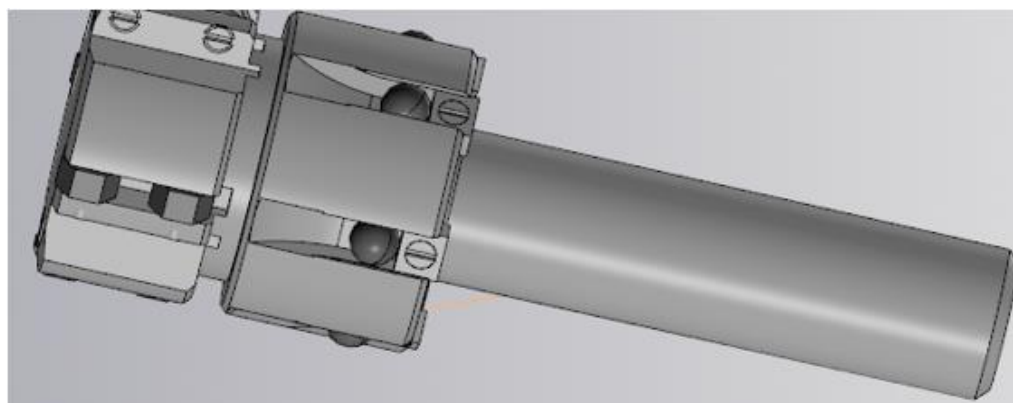
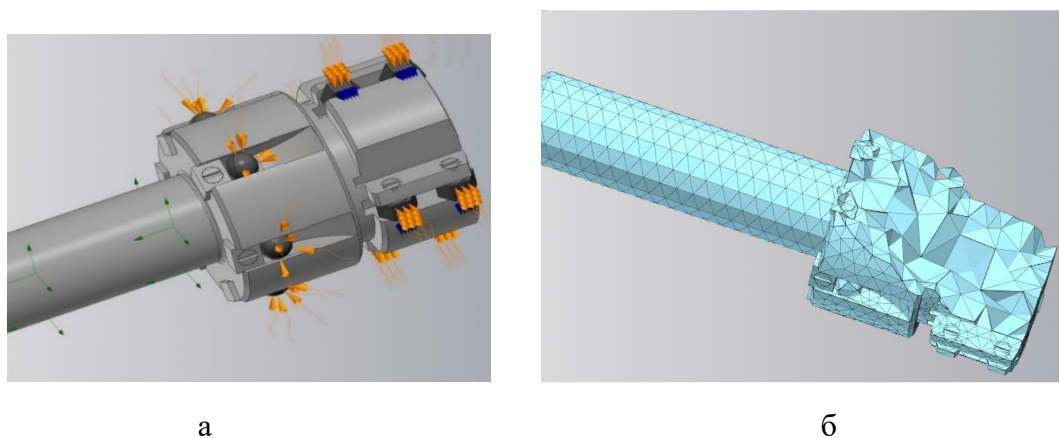


Рисунок 3.20 – Комбинированная развертка

Смазочно-охлаждающие технологические среды (СОТС)- эффективное средство повышения производительности процесса, стойкости режущего лезвийного или абразивного инструмента, стабилизации качества обработанных поверхностей [131-134]. При лезвийной обработке малых отверстий (сверление, развертывание, нарезание резьб) в качестве СОТС на производстве применяют олеиновую кислоту- достаточно дорогую и токсичную [106, с. 3-350].

При проведении экспериментальных работ применялась 10%-я эмульсия на основе эмульсола НГЛ-205, с подачей в зону резания под давлением через стандартную систему токарного станка.

При расчете НДС инструмента использовались следующие ПО Kompas3D АРМ FEM, SolidWorks, в результате получили следующие данные (рисунок 3.21).

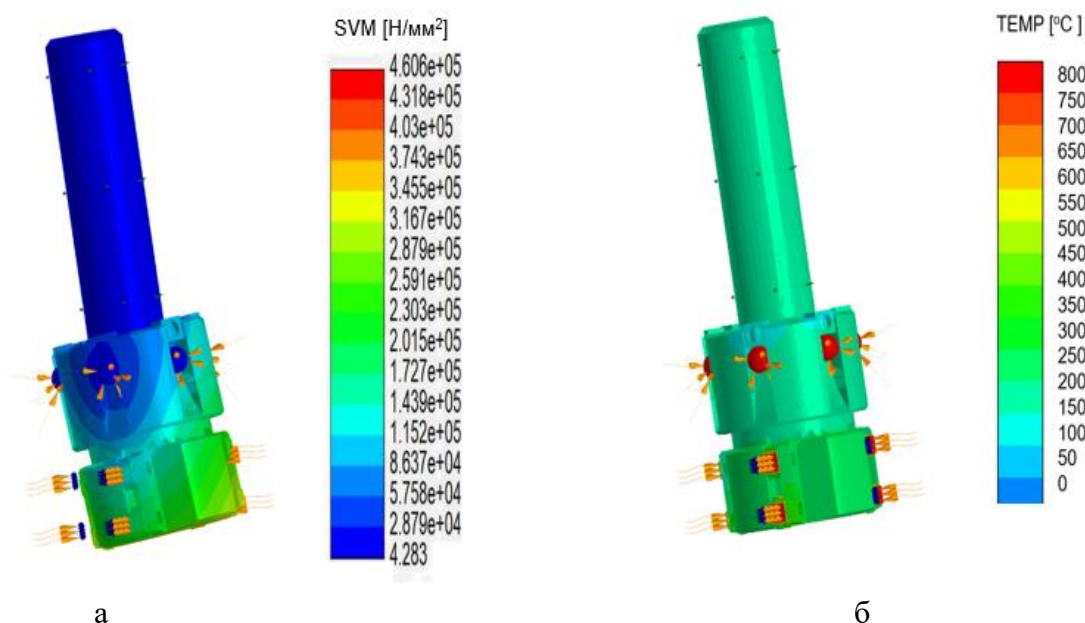


а – локализация нагрузок; б – конечно-элементная сетка

Рисунок 3.21 – Процесс 3D-моделирования с локализацией нагрузок

При проведении прочностных расчетов моделирования необходимо задать полученные силовые параметры при режимах резания на рабочие поверхности и создать конечно-элементную сетку.

При проведении прочностных расчетов моделирования было определено, что в конструкции могут возникать изгибающие силы при превышении режимов обработки (рисунок 3.22).



а – напряженно-деформированное состояние с потерей устойчивости; б – тепловой расчет

Рисунок 3.22 – Результаты прочностного моделирования

При проведении прочностных расчетов моделирования были определено, что в конструкции могут возникать изгибающие силы при превышении режимов обработки [135-137].

Выводы по третьему разделу:

Эффект упрочнения поверхностного слоя, который был обработан комбинированным инструментом для обработки гладкого цилиндрического отверстия, при измерениях показал величину равную глубине 0,7...1 мм, это достигается при использовании определенных режимов обработки для комбинированного инструмента;

Поверхностный слой обработанного отверстия комбинированной разверткой повышает микротвердость поверхностного слоя в 1,2-1,5 (при исходной твердости поверхностного слоя HRC 30-40) раза по сравнению с традиционными методами обработки резанием;

Изменение размеров зерен на поверхностном слое обработанного материала, а также относительное удлинение их вдоль направления силы деформации зависит от режимов обработки и влиянием на поверхность контакта детали с инструментом и превышением предела текучести в обрабатываемом поверхностном слое. Радиус деформирующего шарика определяют величину упрочнения, а также качество обработанного комбинированным инструментом поверхностного слоя металла.

Математическая модель натяга, допустимого максимальным пределом деформации при обработке комбинированной разверткой с раскатными шариками, была установлена экспериментально. Величина натяга функционально связана с толщиной стенки изделия, и позволяет использовать

данную зависимость для прогнозирования качественных характеристик поверхностного слоя. Шероховатость поверхностного слоя для обработки отверстия разработанным инструментом, обеспечивающая последующую качественную обработку, может быть получена чистовым или тонким точением на токарном станке.

Создана сборочная модель комбинированной развертки при помощи 3х-мерного моделирования в ПО КОМПАС-3D для машиностроительной конфигурации.

В случае превышения предельных режимов обработки, в конструкцию комбинированного инструмента необходимо дополнить направляющей частью для исключения изгибающей силы.

4 РЕЗУЛЬТАТЫ ПРАКТИЧЕСКОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

4.1 Разработка методики проектирования комбинированной развертки

Инструмент выбирается, конструируется и рассчитывается применительно к обработке заданной поверхности детали с учетом ее общей конструкции и возможной обработки им других поверхностей при определенном закреплении и выполнении операций на заданном станке (например, проточка поверхности и подрезка торца, снятие фаски и др.), с учетом вида материала детали, его физикомеханических свойств и состояния (нормализованный, отожженный, закаленный, с указанной твердостью или прочностью). Если заданный станок не подходит для обработки данным инструментом, то следует ориентироваться по наличию оборудования, на станок наиболее целесообразный для обработки данной детали с учетом типоразмера.

Выбор конструкции, размеров, геометрии заточки, материала режущей части и оправки инструмента должен быть обоснован с точки зрения достижения наибольшей производительности и экономичности обработки, прочности и стойкости инструмента и обеспечения заданного качества обработанной поверхности - шероховатости, наклепа, остаточных напряжений, точности с учетом места операции в технологическом процессе (черновая, получистовая, чистовая).

Разработка комбинированного процесса обработки отверстий рекомендуется проводить в следующем порядке:

1. Определение необходимого оборудования.
2. Выбор ключевых конструктивных и геометрических параметров инструмента, а также формулирование технических требований к нему.
3. Отбор универсальных устройств и приспособлений, которые требуются для обработки на выбранном оборудовании.
4. Расчет припуска для обработки.
5. Установление режимов обработки.
6. Проверка выбранных параметров на соответствие условиям нормального хода процесса.
7. Расчет технико-экономических показателей.

Проведение технико-экономических расчетов. Все основные последовательности собраны в ПО для расчета и порядок проектирования отражен на рисунке 4.1.

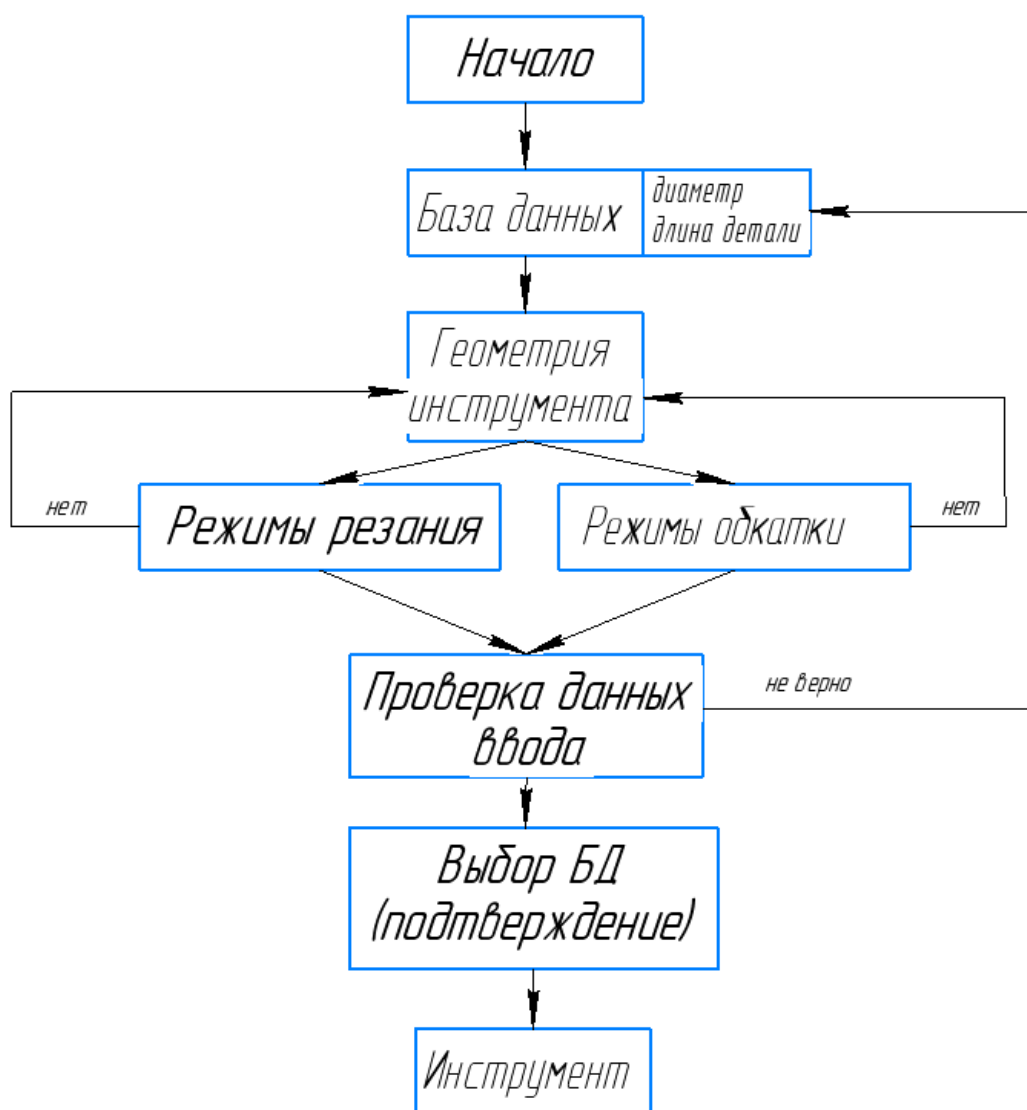


Рисунок 4.1 – Общий алгоритм разработки комбинированной развертки

Благодаря автоматизированным системам и базам данных для расчета общий алгоритм для создания комбинированного инструмента будет состоять из набора требований к изготавливаемой детали (обрабатываемый диаметр, длина отверстия, чистота поверхности, точность и т.д.), набором параметров геометрии инструмента для режущих элементов конструкции (пластины, углы, скорость резания и др.) а так же характеристиками элементов раскатных шариков (материал, диаметр, крепление). Эти данные позволят в полной мере определить и проверить данные для соответствия заданному уровню качества для получаемой детали [132, с. 3-299; 133, с. 3-638; 135, с. 3-220; 136, с. 24-26]. Результатом становится отображение точных расчетных элементов, составляющих конструкции комбинированной развертки для обработки отверстий.

4.2 Предложения по рациональной эксплуатации комбинированных разверток

Нормальная работа инструмента возможна при условии минимального биения. Применяемое оборудование не всегда имеет соответствующую точность радиального биения шпинделя в совокупности с точностью установки инструмента в шпиндель.

Сменная режущая часть 4 и 3 уменьшит стоимость инструмента (рисунок 4.2). После окончания периода стойкости утилизируется не вся развертка, а только режущая часть 2 дорогостоящий хвостовик 1 имеет высокую стойкость и прочность.

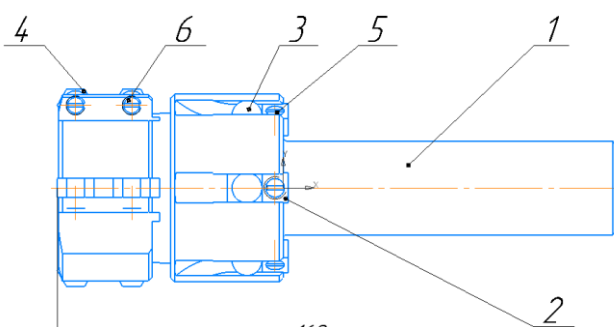


Рисунок 4.2 – Сборная конструкция комбинированной развертки

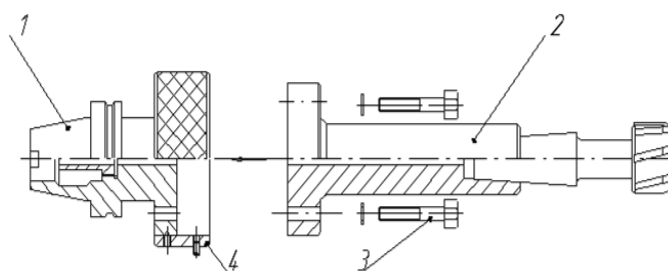


Рисунок 4.3. Вспомогательный инструмент

Система вспомогательного инструмента (рисунок 4.3) позволяет компенсировать возникающее радиальное биение. Конструктивно такой инструмент состоит из двух частей- базовой оправки 1 с соответствующим присоединением к станку и переходника 2 для закрепления развертки. Переходник крепится к базовой оправке винтами 3. собранный инструмент устанавливают в шпиндель станка и с помощью индикатора с ценой деления 0,001 мм проверяется радиальное биение по режущим кромкам или по шлифованной шейке на переходнике. Затем регулировочное кольцо 4 поворачивается так, чтобы регулировочный винт оказался диаметрально противоположен точке с наибольшим биением. Вращением винта смещают переходник на величину, равную половине величины биения. Операция повторяется до тех пор, пока биение в любой точке не станет меньше 0,003 мм. Затем затягивают винты 3.

Характеристика инструмента – его производительность. Среди факторов, определяющих производительность инструмента на первом месте, выступает инструментальный материал.

Перспективным инструментальным материалом является, несомненно, твердый сплав. Его объем использования в 2003 году составил 70%, из них 38% твердые сплавы с покрытием методом CVD и 15% с покрытием PVD. Общая ориентация инструментальной промышленности на многослойные износостойкие покрытия.

Тенденция же в конструировании инструмента – это быстросменный, переналаживаемый и имеющий высокую размерную стойкость инструмент. Рынок инструмента для обработки отверстий принадлежит многим фирмам. Высокопроизводительные развертки различных фирм позволяют осуществлять обработку на скоростях резания в несколько раз, превышающие общепринятые для разверток. Скорость резания может достигать до и выше 75 м/мин, подача может достигать 0,2-0,3 мм на каждый зуб. Результат сокращение основного времени в несколько раз [137, с. 3-214].

4.3 Увеличение стойкости комбинированного инструмента

Способность материала, из которого он изготовлен, сохранять свои физические свойства в определённый период времени до переточки и увеличение стойкости металлорежущего инструмента чрезвычайно важно, т.к. приносит значительный экономический эффект.

В настоящий момент можно говорить о таких способах повышения стойкости инструментов:

1. Применение новых инструментальных материалов.
2. Износостойкие многослойные покрытия.
3. Химико-термическая обработка.
4. Механическое упрочнение.
5. Обработка холодом.
6. Оптимальная геометрия клина, совершенствование конструкции инструмента.
7. Дополнительная заточка и доводка металлорежущего инструмента, правильный выбор метода заточки инструмента.
8. Наложение колебаний.
9. Введение в цепь инструмент – деталь - станок компенсирующей ЭДС.
10. Оптимальная схема обработки.
11. Установление оптимальных режимов обработки.
12. Резание металлов с подогревом.
13. Смазочно-охлаждающая среда и способы ее подвода.
14. Применение в качестве смазки поверхностно-активных металлов.

Стойкость инструмента во многом предопределяется физико-механическими свойствами материала, из которого изготовлена его режущая часть. За последнее время разработаны и получены инструментальные материалы, обладающие весьма высокой стойкостью, при которой обеспечивается высокая точность обработки со значительной экономией затрат.

Для комбинированной обработки можно рекомендовать [126, с. 11-18]:

- безвольфрамовый твердый сплав группы TiC-Ni-Mo «монитикар», по своим свойствам превосходящий стандартные твердые сплавы ТНМ-25 и ТНМ-30;

- твердый сплав КНТ-16 (карбонитрит титана TiCN-84%, молибденоникелевая связка MoNi-16%). Плотность этих сплавов 5,43-5,8 г/см³; предел прочности при изгибе не менее 100 кгс/мм²; твердость не менее HRC 90, при этом стойкость в 2,5-3 раза превышает стойкость твердого сплава Т15К6;

- синтетические сверхтвердые материалы на основе поликристаллических алмазов и керамические на основе нитрида кремния (Si₃N₄);

- режущая керамика ВСК 60, 63 приемлема для работы с трением скольжения;

- композиты.

Последние разработки, посвященные чистовой обработке, позволили получить абразивосодержащие покрытия с ориентированными зёрнами. Ориентация зёрен в электромагнитном поле резко снижает затраты абразивного материала, что ведет к снижению стоимости с одновременным повышением стойкости инструмента в десятки раз.

Для высокопроизводительной черновой обработки возможно применение нового сплава GC4005, как основы под покрытие Al₂O₃ большой толщины, что увеличивает стойкость к пластическому деформированию и износу по задней поверхности в 5 раз.

Пластины с покрытием TiAlN работают на 100% быстрее, чем пластины без покрытия и на 40% превосходят марки пластины с TiN покрытием.

Многообразие обрабатываемых материалов и новых методов обработки определяет быстрое развитие новых видов покрытий. Метод CVD расширен за счет средне – и низкотемпературных режимов. Методом PVD получают покрытия с разным составом и различными свойствами. Основные рекомендуемые покрытия при обработке стали 45: TiN, TiN+WC, TiAlNi, TiAlN+WC.

Ионной имплантацией принято называть легирование тонких приповерхностных слоев твердого тела путем облучения поверхности пучком ионов, ускоренных до энергии 104-106 эВ, или в технологии машиностроения ее еще называют «имплантационная металлургия». Испытания модифицированных таким образом твердосплавных пластин типа Т15К6 и ВК6 показали, что их стойкость повышается в 2-2,5 раза по сравнению с аналогичными не обработанными [129, с. 175; 130, с. 15-16].

Появление благоприятных остаточных напряжений сжатия в сочетании с высоким уровнем микротвердости и оптимальной шероховатостью поверхности способствует снижению интенсивности трещинообразования и уменьшению воздействия химически активных веществ, образующихся в зоне резания. Следует отметить, что при упрочняющей обработке инструмента, подвергнутого предварительному деформированию, микротвердость на поверхности оказывается ниже, чем на глубине, поскольку полностью избежать

образования поверхностных дефектов не удастся, а это является одной из причин снижения микротвердости. В подобных случаях целесообразно удалять дефектный слой с пониженной микротвердостью, что позволяет одновременно управлять параметрами шероховатости поверхности режущей части. Для этого применяют шлифование лепестковыми кругами. Такая обработка не вызывает существенного повышения температуры в зоне контакта круга с обрабатываемой поверхностью и практически не влияет на релаксацию сформированных напряжений.

Намагничивание инструмента до определенной величины всегда играет положительную роль, оно может значительно увеличить срок службы инструмента.

При помещении резцов в магнитное поле средней напряженности, так, чтобы на рабочей части резца наводилась ориентация кристаллов (северная полярность) стойкость их увеличивается до 2-х раз [138].

При помещении разверток в магнитное поле высокой напряженности стойкость резцов с северной полярностью в 2,5 раза больше, а с южной полярностью несколько ниже, чем немагнитных. После 3-х переточек стойкость остается в 2 раза большей.

Влияние намагниченности инструмента на его стойкость объясняется тем, что магнитное поле в соответствии с известными законами изменяет поток электронов, протекающих в цепи станок – приспособление – инструмент – деталь. В результате меняются и тепловые потоки в резце, оказывающие влияние на стойкость инструмента.

Применение обработки режущего инструмента в бегущем магнитном поле в течении 0,1-1 с увеличивает стойкость в 5-6 раз.

Предварительный подогрев срезаемого слоя в определенных условиях повышает стойкость режущего инструмента и производительность обработки при точении, фрезеровании, строгании и т.д. При подогреве срезаемого слоя уменьшается сопротивление обрабатываемого материала пластической деформации в зоне стружкообразования и понижаются контактные напряжения, действующие на инструмент. В связи с этим обычно повышается коэффициент запаса хрупкой прочности инструментального материала и, как следствие, предельно допускаемые толщина и ширина среза. Одновременно может снижаться интенсивность адгезионно-усталостного износа. В результате в условиях обработки с подогревом появляется возможность повысить производительность и режимы обработки [139].

При использовании интенсивного внутреннего охлаждения инструмента, появляется возможность уменьшения температуры резания на умеренных скоростях до 150 К и более. Очевидно, что в этом случае можно повысить в той же мере и температуру подогрева, а этого может хватить для разупрочнения многих труднообрабатываемых материалов.

Смазочно-охлаждающие технологические среды (СОТС) – эффективное средство повышения производительности процесса, стойкости режущего лезвийного или абразивного инструмента, стабилизации качества обработанных поверхностей. При лезвийной обработке малых отверстий

(сверление, развертывание, нарезание резьб) в качестве СОТС на производстве применяют олеиновую кислоту – достаточно дорогую и токсичную.

В настоящий момент разработана гамма импрегнаторов сухого действия в виде карандашей твердой смазки (КТС). В состав КТС входит стеарин, наполнители и активаторы. Роль стеарина в составе образовывать на поверхности инструмента пленки с поверхностно-активными свойствами. Наполнители выступают в роли граничной смазки и препятствуют схватыванию обрабатываемого материала с инструментом.

Активаторы способствуют удалению окисных пленок с поверхности металла и улучшению стружкообразования, т.е. повышают производительность процесса обработки.

Как известно, некоторые расплавы легкоплавких металлов являются поверхностно-активными по отношению к конструкционным металлам. Благодаря поверхностной активности жидкий металл может образовать на поверхности твердого металла адсорбционные пленки с низким сопротивлением сдвигу, способные выдерживать значительные нормальные давления. Поэтому поверхностно-активные металлы (ПАМ), если их применить при резании в качестве смазки, в значительной мере снижают трение между контактными поверхностями инструмента, стружки и изделия.

При экспериментах в качестве поверхностно-активного металла применялся эвтектический сплав олова с цинком, температура расплава поддерживалась около 250°C.

Уменьшение коэффициента трения ведет к уменьшению усадки стружки, длины контакта стружки с резцом и сил резания P_x и P_y .

Поверхностно-активные металлы оказывают влияние на характер стружкообразования. Этим обуславливается снижение сил резания, которое обнаруживается при работе в среде ПАМ даже тогда, когда смазывающее действие ПАМ не наблюдается.

Снижение энергетических затрат на резание приводит к уменьшению, тепловыделения и температуры.

Одним из преимуществ ПАМ перед обычными СОЖ является то, что в их среде исключаются тепловые удары, вызываемые обычно срывами струи, паровыми рубашками и др [140]. Уменьшение силовых и тепловых нагрузок способствует повышению стойкости инструмента [141, 142]. Результат расчета себестоимости изготовления гильзы гидравлического привода при обработке комбинированной развёрткой и традиционным методом на предприятии приведен в таблице 4.1

Таблица 4.1 – Сравнительная таблица

Показатель	Имеющаяся сумма, тыс. тг.	Разработанная конструкция сумма, тыс. тг.
1	2	3
Материальные затраты	21000	20505
Зарплата	1680	1540

Продолжение таблицы 4.1

1	2	3
Расходы на содержание и эксплуатацию оборудования	5000	4860
<i>Себестоимость одного гидроцилиндра, тг.</i>	27680	26905
Разница		7 750

Для изготовления гидроцилиндра одного вида. Готовая продукция учитывается по фактической себестоимости. Затраты на производство 10 000 шт. изделий смотрите в таблице.

Так как это одно номенклатурное производство, не требуется разносить между видами продукции. Как вывод, решение сведется к суммированию всех трат и делению на 10 000 штук.

Выводы по четвертому разделу

Нормальная работа инструмента возможна при условии минимального биения, что обуславливает применение специальных приспособлений, так как применяемое оборудование может не соответствовать точности радиального биения шпинделя.

Алгоритм создания комбинированной развертки позволяет в полной мере определить основные составляющие конструкции режущего инструмента с последующей подготовкой технологической карты для его изготовления.

Увеличение ресурса работы и периода стойкости рабочих элементов конструкции комбинированного инструмента может быть увеличен за счет применения инновационных технологий с использованием СОЖ.

Конструкция может быть использована для гильз гидроцилиндров с целью уменьшения пары трения со штоком, и как следствие увеличения ресурса работы гидроподъемного механизма.

Разработанная компьютерная модель комбинированной развертки позволяет обеспечить эффективное проектирование инструмента с учетом напряженных мест режущего инструмента и действующих сил сопротивления резанию

Сокращение числа операций при изготовлении может определить ожидаемая экономическая эффективность внедрения технологического процесса изготовления гидравлического цилиндра до 847 000 тг.

Также технология может быть внедрена в условиях действующих ремонтных предприятий АО «Завод им. С. Кирова», АО «ПЗТМ», ВФ «ПОИСК» по изготовлению гидравлических цилиндров.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Краткие **выводы** по результатам диссертационных исследований
Основные научные и практические выводы диссертационной работы заключаются в следующем:

1. На основании проведенных исследований установлено, что с применением нового комбинированного инструмента для обработки внутренних цилиндрических отверстий повышает качество рабочей поверхности: увеличение твердости поверхностного слоя с 30 HRC до 45 HRC, уменьшение шероховатости до Ra 0,32 мкм.

2. Экспериментальные исследования материала и его свойств, приобретаемых в результате комбинированной обработки, показали:

– упрочнение поверхностного слоя обработанного отверстия наблюдается на глубине до 0,8...1,1 мм;

– твердость поверхностного слоя обработанного отверстия повысилась в 1,5 раза;

– была создана модель комбинированного процесса обработки отверстий в цилиндрах, которая устанавливает соответствие между геометрическими характеристиками и физико-механическими свойствами обрабатываемой поверхности с конструктивными параметрами инструмента и режимами обработки.

Экспериментально установлено:

1. Высота неровностей прямо пропорциональна величине подачи.

2. Скорость комбинированной обработки не оказывает существенного влияния на качество поверхностного слоя, но является лимитирующим фактором теплообразования.

3. Определены тепловые и силовые характеристики комбинированного инструмента, ориентированного по направлению сил, возникающих в инструменте в процессе резания.

4. Разработанная компьютерная модель комбинированной развертки позволяет обеспечить эффективное проектирование инструмента с учетом напряженных мест режущего инструмента и действующих сил сопротивления резанию.

5. Было выяснено, что во время комбинированной обработки контактное давление, которое не приводит к разрушению, помогает уменьшить шероховатость поверхностного слоя.

6. Шероховатость предварительной обработки отверстий Ra0,8, обеспечивающая следующую более качественную обработку отверстия до значения Ra0,32 мкм, может быть получена комбинированным инструментом с режущей частью с оптимальным главным углом в плане 6°.

7. Радиус деформирующего элемента 5 мм определяют степень упрочнения и качество поверхностного слоя.

Оценка технико-экономической эффективности при внедрении

В результате подготовки диссертационных исследований в работе все поставленные задачи решены в полном объеме:

- разработаны рекомендации по определению конструктивных параметров комбинированного инструмента;
- разработана методика расчета сборного комбинированного инструмента для обработки отверстий.

Усовершенствованная технология изготовления гильзы гидроцилиндра сокращает количество технологических операций и уменьшает затрачиваемое технологическое время, количество используемого режущего инструмента.

Также технология может быть внедрена в условиях действующих ремонтных предприятий АО «Завод им. С. Кирова», АО «ПЗТМ», ВФ «ПОИСК» по изготовлению гидравлических цилиндров.

Гладкая гильза механизма гидравлического цилиндра выполняется с заданным припуском для выполнения операции раскатка. Этот вид обработки основан на применении пластических свойств металла получать остаточную деформацию без разрушения под воздействием внешних сил.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 Указ Президента Республики Казахстан. О Государственной программе по форсированному индустриально-инновационному развитию Республики Казахстан на 2010-2014 годы и признании утратившими силу некоторых указов президента Республики Казахстан: утв. 19 марта 2010 года, №958 // https://adilet.zan.kz/rus/docs/U100000958_.10.10.2023.

2 Жетесова Г.С., Муравьев О.П., Жаркевич О.М. Влияние остаточных напряжений обработки на прочность элементов механизированных крепей // Новости науки Казахстана. – 2008. – №1. – С. 82-87.

3 Жетесова Г.С. Анализ разрушений и деформаций элементов конструкций механизированных крепей. // Тр. КарГТУ. – 2002. – №1. – С. 9-11.

4 Пивень Г.Г., Жетесова Г.С. Влияние износа деталей в соединениях гидростоек на ресурс времени работы секций механизированных крепей // Тр. КарГТУ. – 2002. – №3. – С. 42-44.

5 Жетесова Г.С., Жаркевич О.М., Жунусова А.Ш. и др. Расчет прочности параметров гидростоек механизированных крепей // Фундаментальные исследования. – 2012. – №6. – С. 423-428.

6 Жаркевич О.М. Оценка усталостной прочности цилиндров гидростоек механизированных крепей // Вестник КазНТУ. – 2011. – №3. – С. 55-60.

7 Жетесова Г.С., Жаркевич О.М., Бузауова Т.М. и др. Повреждение гидростоек механизированных крепей и способы их устранения // Вестник КазНТУ. – 2013. – №1(95). – С. 84-89.

8 Жетесова Г.С., Жаркевич О.М. Определение технико-экономических показателей механизированной крепи «Глиник» // Тр. КарТУ. – 2005. – №3. – С. 33-35.

9 Жетесов С.С., Жетесова Г.С. Исследование трудоемкости восстановления элементов секций механизированных крепей при их эксплуатации. // Тр. междунар. эконом. конгрес. «Актуальные проблемы экономики и финансов Республики Казахстан». – Караганда, 2003. – С. 251-252.

10 Жетесова Г.С., Жаркевич О.М. Анализ способов восстановления втулок гидростоек механизированных крепей. // Mater. 4th miedzynar. nauk.-prakt. konf. «Naukowy potencjal smiata – 2008». – Prezemysla, 2008. – С. 8-10.

11 Жетесова Г.С., Жаркевич О.М. Выбор рационального способа восстановления элементов гидростоек механизированных крепей. // Mater. 5th mezinar. ved.-prakt. conf. «Veda a technologie – Krok do Budoucnosti – 2009». – Praha, 2009. – С. 24-27.

12 Жетесова Г.С., Жаркевич О.М. и др. Способы восстановления гидростоек механизированных крепей // Матер. 11-й междунар. конф. «Ресурсосберегающие технологии ремонта, восстановления и упрочнения деталей машин, механизмов, оборудования, инструмента и технологической оснастки от нано- до макроуровня». – СПб., 2009. – С. 425-429.

13 Балабышко А.М. и др. Гидропривод механизированных крепей: учеб. пос. – М., 2002. – 137 с.

- 14 Лепешкин А.В., Михайлин А.А., Шейпак А.А. Гидравлика и гидропневмопривод: гидравлические машины и гидропневмопривод: учеб. – М.: ИНФРА-М, 2019. – 446 с.
- 15 Subramanya K. Hydraulic Machines. – New Delhi: Tata McGraw Hill Education Private Limited, 2013. – 599 p.
- 16 Rajput R.K. A Textbook of Fluid Mechanics and Hydraulic Machines. – New Delhi: S. Chand & Company, 2016. – 1588 p.
- 17 Сафохин М.С. и др. Горные машины и оборудование: учеб. – М.: Недра, 1995. – 463 с.
- 18 Промышленный каталог статей ТОО «Метизно-фланцевый завод» // <https://www.12821-80.ru/articles/a3608>. 10.10.2023.
- 19 Никитин О.Ф. Гидравлика и гидропневмопривод. – М.: Изд. МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. – 414 с.
- 20 Берикбаева М.А., Танирбергенова А.А. Совершенствование технологии обработки внутренней поверхности отверстий гидроцилиндров // Sciences of Europe. – 2022. – №87. – С. 63-68.
- 21 Розенберг О.А. Механика взаимодействия инструмента с изделием при деформирующем протягивании. – Киев: Наук. думка, 1981. – 288 с.
- 22 Денисова Э.И., Карташов В.В., Рычков В.Н. Прикладное материаловедение: металлы и сплавы. – Екатеринбург, 2018. – 216 с.
- 23 Материаловедение / под ред. В.С. Кушнера. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2008. – 232 с.
- 24 Мухамадеева Р.М. Особенности финишной обработки отверстий // Тр. КарГУ. – 2006. – №4(25). – С. 64.
- 25 Ротанова В.А., Власова А.А., Бугрова А.Н. и др. Этапы обработки отверстий в металлах этапы обработки отверстий в металлах <https://web.snauka.ru/issues/2020/12/94134>. 10.10.2023.
- 26 Барановская Л.П., Берненко Н.О. Зависимость адгезии покрытия от шероховатости // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. – 2017. – Т. 2, №13. – С. 760-762.
- 27 Герасимов В.Я., Губанов В.Ф. Применение неразрушающих методов контроля качества механической обработки цилиндрических поверхностей деталей // Известия вузов. Машиностроение. – 2005. – №11. – С. 58-62.
- 28 Джон Н., Лион Ф. Статистика и планирование эксперимента в технике и науке: методы обработки данных / пер. с англ. – М.: Мир, 1980. – Т. 1. – 610 с.
- 29 Левин А.И. Математическое моделирование в исследованиях и проектировании станков. – М.: Машиностроение, 1978. – 184 с.
- 30 Мухамадеева Р.М. Повышение качества обработки отверстий комбинированными режущо-деформирующими развертками: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2004. – 144 с.
- 31 Торбило В.М. Алмазное выглаживание. – М., 1972. – 105 с.
- 32 Хайруллии Б.Т., Берикбаева М.А. Гидроцилиндрдин ішкі беттерін заманауи әдіспен өңдеу // Вестник Алматинского университета энергетики и связи. – 2019. – №4(47). – С. 177-187.

- 33 Комбинированные методы обработки // <https://www.sites.google.com/site/magistbrgu/vvedenie/klassifikacia-metodov-efhko>. 10.10.2023.
- 34 Ярославцев В.М. Особенности энергетического воздействия на материал заготовки при резании с опережающим пластическим деформированием // <https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti>. 10.10.2023.
- 35 Целиков А.И., Смирнов В.В. Прокатные станы. – М., 1958. – 432 с.
- 36 Ковалевская Ж.Г. Структура и свойства поверхностных слоев и покрытий при модифицирующей ультразвуковой обработке: дис. ... док. техн. наук: 05.16.09. – Томск, 2018. – 334 с.
- 37 Буркин С.П., Шимов Г.В., Андрюкова Е.А. Остаточные напряжения в металлопродукции: учеб. пос. – Екатеринбург, 2015. – 248 с.
- 38 Yen Y.C., Sartkulvanich P., Altan T. Finite element modeling of roller burnishing process // CIRP annals. – 2005. – Vol. 54, Issue 1. – P. 237-240.
- 39 Паршин В.С. и др. Практическое руководство к программному комплексу DEFORM3D. – Екатеринбург: УрФУ, 2010. – 266 с.
- 40 Блюменштейн В.Ю., Махалов М.С. Механика процесса поверхностного пластического деформирования. Модель упрочняемого упругопластического тела // Обработка металлов (Технология. Оборудование. Инструменты). – 2018. – Т. 20, №4. – С. 6-20.
- 41 Бобровский Н.М. и др. Инновационные технологии механической обработки деталей машин поверхностно-пластическим деформированием : учеб. пос. – Тольятти: Изд-во ТГУ, 2013. – 80 с.
- 42 Приходько В.М., Петрова Л.Г., Чудина О.В. Металлофизические основы разработки упрочняющих технологий. – М., 2003. – 384 с.
- 43 Драпкин Б.М., Кононенко В.К., Безъязычный В.Ф. Свойства сплавов в экстремальном состоянии. – М.: Машиностроение, 2004. – 256 с.
- 44 Сулима А.М., Шулов В.А., Ягодкин Ю.Д. Поверхностный слой и эксплуатационные свойства деталей машин. – М., 1988. – 239 с.
- 45 Лежнев С.Н. Теоретические основы обработки металлов давлением: учеб. пос. – Темиртау: КГИУ, 2013. – 124 с.
- 46 Малышев В.И. Технология изготовления режущего инструмента: учеб. пос. – Изд. 2-е, стер. – Тольятти : Изд-во ТГУ, 2014. – 368 с.
- 47 Родин П.Р. Металлорежущие инструменты. – Киев, 1974. – 400 с.
- 48 Алифанов А.В., Анисович А.Г. и др. Технология и инструмент для упрочнения деталей сферической формы методом обкатки // Литье и металлургия. – 2006. – №1(37). – С. 151-153.
- 49 Галлер Ю.А. Инструментальные стали. – М.: Металлургия, 1975. – 584 с.
- 50 Сторожев М.В., Попов Е.А. Теория обработки металлов давлением. – Изд. 3-е. – М., 1971. – 424 с.
- 51 Кыонг Н.К. Повышение качества мало жестких валов поверхностным пластическим деформированием в стесненных условиях: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08. – Иркутск, 2018. – 156 с.

- 52 Yaman N., Sunay N., Kaya M. et al. Enhancing surface integrity of additively manufactured Inconel 718 by roller burnishing process // *Procedia CIRP*. – 2022. – Vol. 108, Issue 6. – P. 681-686.
- 53 Frihat M.H., Al Quran F.M.F., Al-Odat M.Q. Experimental investigation of the influence of burnishing parameters on surface roughness and hardness of brass alloy // *Material Science & Engineering*. – 2015. – Vol. 5, Issue 1. – P. 1000216.
- 54 Справочник технолога-машиностроителя: в 2 т. / под ред. А.М. Дальского и др. – М.: Машиностроение, 2001. – Т. 1. – 912 с.
- 55 Папшев Д.Д. Отделочно-упрочняющая обработка поверхностным пластическим деформированием. – М.: Машиностроение, 1978. – 152 с.
- 56 Справочник технолога-машиностроителя: в 2 т. / под ред. А.М. Дальского и др. – М.: Машиностроение, 2001. – Т. 2. – 905 с.
- 57 Суслов А.Г., Дальский А.М. Научные основы технологии машиностроения. – М.: Машиностроение, 2002. – 684 с.
- 58 Технология и инструменты отделочно-упрочняющей обработки деталей поверхностным пластическим деформированием: справоч.: в 2 т. / под ред. А.Г. Суслова. – М.: Машиностроение, 2014. – Т. 2. – 444 с.
- 59 Махалов М.С. Совершенствование технологии упрочняющей обработки деталей машин размерным совмещенным обкатыванием: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08. – Кемерово, 2007. – 298 с.
- 60 Бурцев В.М. и др. Технология машиностроения: в 2 т. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. – Т. 1. – 564 с.
- 61 Бурцев В.М. и др. Технология машиностроения: в 2 т. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. – Т. 2. – 640 с.
- 62 Термическая обработка в машиностроении: справочник / под ред. Ю.М. Лахтина, А.Г. Рахмштадта. – М.: Машиностроение, 1980. – 783 с.
- 63 Худобин Л.В. и др. Базирование заготовок при механической обработке. – Старый Оскол: ТНТ, 2011 – 248 с.
- 64 Ebner R., Hellman P., Koosch F. et al. Getting to know special steel. *Special metallurgy*. – Milano: Edizioni sipiel, 2005. – 135 p.
- 65 Боровский Г.В. и др. Справочник инструментальщика. – М.: Машиностроение, 2005. – 464 с.
- 66 Верещака А.С. Работоспособность режущего инструмента с износостойкими покрытиями. – М.: Машиностроение, 1993. – 336 с.
- 67 Геллер Ю.А. Инструментальные стали: справоч. – М.: Metallurgy, 1975. – 584 с.
- 68 Одинцов Л.Г. Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием: справоч. – М.: Машиностроение, 1987. – 328 с.
- 69 Смелянский В.М. Механика упрочнения поверхностного слоя деталей машин в технологических процессах поверхностного пластического деформирования. – М.: МАШМИР, 1992. – 60 с.
- 70 Шнейдер Ю.Г. Инструменты для чистовой обработки металлов давлением. – Л.: Машиностроение, 1971. – 248 с.

- 71 Минаков А.П. и др. Технологические основы финишной упрочняющей пневмовибродинамической обработки нежестких деталей в машиностроении. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2015. – 251 с.
- 72 Свирепа Д.М. Технологическое обеспечение качества внутренней цилиндрической поверхности деталей магнитодинамическим накатыванием: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08. – Могилев, 2013. – 163 с.
- 73 Баранов С.А., Фокин В.Д., Зенова В.И. и др. Обработка поверхностным пластическим деформированием плоских поверхностей деталей машин // <http://e.biblio.bru.by/handle/1212121212/5131?show=full>. 10.10.2023.
- 74 Блюменштейн В.Ю., Митрофанова К.С. Моделирование процесса упрочняющего обкатывания сложнопрофильным инструментом // Инновации в машиностроении: сб. ст. – Новосибирск, 2017. – С. 528-537.
- 75 Митрофанова К.С., Блюменштейн В.Ю. Анализ влияния запаса пластичности на накопление деформаций при ППД сложнопрофильным инструментом // Упрочняющие технологии и функциональные покрытия в машиностроении: сб. тр. – Кемерово, 2017. – С. 111.
- 76 Колмогоров В.Л. Пластичность и разрушение. – М.: Металлургия, 1977. – 337 с.
- 77 Аймуханбет Б.А., Поветкин В.В. Расчет гидравлических цилиндров механизированных крепей на прочность // Матер. 3-й междунар. науч.-практ. конф. «Фундаментальные и прикладные науки сегодня» – Норт-Чарлстон, 2014. – С. 169-175.
- 78 Браславский В.М. Технология обкатки крупных деталей роликами. – Изд. 2-е. – М.: Машиностроение, 1975. – 159 с.
- 79 Пат. 2037680 РФ. Силовой гидроцилиндр / Лебедев А.В.; опубл. 19.06.95, Бюл. №24. – 5 с.
- 80 Пат. 2211967 РФ. Комбинированный гидроцилиндр двухстороннего действия / Богданов А.С.; опубл. 10.09.03. – 9 с.
- 81 Пат. 2161253 РФ. Силовой гидроцилиндр / Пелевин Ю.В. и др.; опубл. 27.12.00. – 4 с.
- 82 Пат. 2422685 РФ. Гидроцилиндр / Новоселов Б.В., Лукьянов Л.Е. и др.; опубл. 27.06.11, Бюл. №18. – 7 с.
- 83 Пат. 2195587 РФ. Гидроцилиндр с двухсторонним штоком / Кулаковский В.Н., Базлов В.Н.; опубл. 27.12.02. – 7 с.
- 84 Lee K., Kim M., Lee S. Three-dimensional finite element analysis for estimation of the weld residual stress in the dissimilar butt weld piping // Journal of Mechanical Science and Technology. – 2013. – Vol. 27. – P. 57-62.
- 85 Burnley P.C., Getting I.C. Creating a high temperature environment at high pressure in a gas piston cylinder apparatus // Review of Scientific Instruments. – 2012. – Vol. 83. Issue 1. – P. 014501-1-014501-9.
- 86 Аймуханбет Б.А., Поветкин В.В. Моделирование напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя при упрочнении поверхностей методом поверхностного пластического деформирования // Сб. тр. 5-й междунар. науч.-практ. конф. «Проблемы инновационного развития нефтегазовой индустрии». – Алматы, 2013. – С. 259-262.

- 87 Отений Я.Н., Смольников Н.Я., Олыштынский Н.В. Прогрессивные методы обработки глубоких отверстий: монография. – Волгоград, 2003. – 136 с.
- 88 Отений Я.Н. Обоснование оптимальной формы деформирующих роликов при обработке методом поверхностно-пластическим деформированием // Сб. матер. «Современные технологии в машиностроении». – Пенза, 2000. – С. 5-8.
- 89 Смольников Н.Я. Исследования контактной зоны на экспериментальном стенде при поверхностном пластическом деформировании роликом. // Прогрессивные технологии в обучении и производстве: матер. всеросс. конф. – Камышин, 2002. – С. 35.
- 90 Segal V.M. Metal processing by severe plastic deformation // Russian Metallurgy (Metally). – 2006. – №5. – P. 474-483.
- 91 Торбило В.М. Основы обеспечения качества и производительности при отделочно-упрочняющей обработке выглаживанием: дис. ... док. техн. наук: 05.02.08. – Пермь, 1986. – 385 с.
- 92 Анухин В.И. Допуски и посадки. – Изд. 3-е. – СПб.: Питер Принт, 2004. – 208 с.
- 93 Докукин А.В., Коровкин Ю.А., Яковлев Н.И. Механизированные крепи и их развитие. – М.: Недра, 1984. – 288 с.
- 94 Балабышко А.М., Мисько Д.В. Гидравлические стойки повышенной несущей способности // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2003. – №7. – С. 161-162.
- 95 Мисько Д.В. Гидравлические стойки повышенной несущей способности плунжерного типа для механизированных крепей. // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2003. – №7. – С. 155-156.
- 96 Бурков П.В., Буркова С.П. Компьютерное моделирование технологий в нефтегазовом деле: учеб. пос. – Томск, 2012. – 143 с.
- 97 Суслов А.Г. Качество поверхностного слоя деталей машин. – М.: Машиностроение, 2000. – 320 с.
- 98 Суслов А.Г., Браун Э.Д., Виткевич Н.А. и др. Качество машин: справоч.: в 2 т. – М.: Машиностроение, 1995. – Т. 1. – 256 с.
- 99 Суслов А.Г., Гуляев Ю.В., Дальский А.М. и др. Качество машин: справоч.: в 2 т. – М.: Машиностроение, 1995. – Т. 2. – 430 с.
- 100 Коган Б.И., Егоров А.В. Гидроцилиндры горных машин. Технологии восстановления // Вестник КузГТУ. – 2012. – №4. – С. 73-79.
- 101 Дубоделова О.С. Повышение эксплуатационных свойств деталей машин с использованием отделочно-упрочняющей обработки поверхностно-пластическим деформированием // <https://masters.donntu.ru/2005.10.10.2023>.
- 102 Инновац. пат. 30469 РК. Силовой гидроцилиндр / Поветкин В.В., Керимжанова М.Ф., Аймуханбет Б.А. и др.; опубл. 15.10.15, Бюл. №10. – 3 с.
- 103 Воеводин В.В. Оценка параметров гидростоек механизированных крепей методом конечных элементов: автореф. ... канд. техн. наук: 05.05.06. – Кемерово, 2005. – 17 с.
- 104 Шнейдер Ю.Г. Чистовая обработка металлов давлением: монография. – М.; Л.: Машиностроение, 1963. – 270 с.

- 105 Таблицы соответствия твердости // <https://tpi-steel.kz>. 10.10.2023.
- 106 Энтелис С.Г., Берлинер Э.М., Деришева Э.М. и др. Смазочно-охлаждающие технологические средства для обработки металлов резанием: справоч. – М.: Машиностроение, 1986. – 352 с.
- 107 Яньков В.Ю., Попов А.А., Бобырь Г.А. Решение прикладных задач в пакете «Маткад». – М.: Спутник+, 2011. – Кн. 1. – 139 с.
- 108 Яценко В.К., Зайцев Г.З., Притченко В.Ф. Повышение несущей способности деталей машин алмазным выглаживанием: монография. – М.: Машиностроение, 1985. – 232 с.
- 109 Лукьянец В.А. и др. Физические эффекты в машиностроении: справоч. – М.: Машиностроение, 1993. – 224 с.
- 110 Дунаев П.Ф., Леликов О.П., Варламова Л.П. Допуски и посадки: обоснование выбора. – М.: Высшая школа, 1984. – 112 с.
- 111 Торбило В.М. Расчет оптимального усилия при алмазном выглаживании // Станки и инструмент. – 1970. – №2. – С. 25-26.
- 112 Торбило В.М., Донсков А.С. Особенности геометрии контакта при выглаживании // В кн.: Управление качеством в механосборочном производстве. – Пермь, 1973. – С. 83-88.
- 113 Аймұханбет Б.А. Чистовая обработка металлов пластическим деформированием // Тр. 1-й междунар. науч.-техн. конф. «Новое в станкостроении, в материаловедении и автоматизированном проектировании машиностроительного производства». – Алматы, 2010. – С. 39-45.
- 114 Кузнецов В.А., Шестакин П.В., Смирнов А.В. и др. Выглаживание деталей многогранными неперетачиваемыми пластинами // Автомобильная промышленность. – 2010. – №10. – С. 24-25.
- 115 Кузнецов В.А. и др. Исследования качества поверхности при выглаживании деталей многогранными неперетачиваемыми пластинами // Матер. 77-й междунар. науч.-техн. конф. ААИ «Автомобиле- и тракторостроение в России: приоритеты развития и подготовки кадров». – М., 2012. – С. 71-74.
- 116 Хан Г., Шапиро С. Статистические модели в инженерных задачах / пер. с англ. – М.: Сов. радио, 1969. – 395 с.
- 117 Хворостухин Л.А. и др. Обработка металлопокрытий выглаживанием: монография. – М.: Машиностроение, 1980. – 63 с.
- 118 Хворостухин Л.А. и др. Отделка и упрочнение поверхностей деталей машин выглаживанием сверхтвердыми материалами. – М.: ГОСИНТИ, 1971. – 52 с.
- 119 Чекин Г.И. Исследование процесса выглаживания поверхностей деталей машин алмазным инструментом: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08. – М., 1965. – 192 с.
- 120 Ярошевич О.В. 3D-моделирование в среде компас: метод. указ. – Минск, 2007. – 84 с.
- 121 Легкова И.А., Мальцев А.Н., Наумов В.А. Использование компьютерного прочностного анализа для оценки остаточной прочности

конструкций // Пожарная безопасность: проблемы и перспективы. – 2016. – Т. 2, №1(7). – С. 44-46.

122 Схиртладзе А.Г. и др. Технологические наладки изготовления деталей и сборка в машиностроении: учеб. пос. – М., 2003. – 280 с.

123 Hongyun L., Jianying L., Lijiang W. et al. The effect of burnishing parameters on burnishing force and surface microhardness // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2006. – Vol. 28, Issue 7. – P. 707-713.

124 Овсеев А.Н., Серебряков В.И., Гаек М.М. Технологическое обеспечение качества изделий машиностроения: монография. – М.: Янус-К, 2003. – 296 с.

125 Маслов А.Р. Инструментальные системы машиностроительных производств: учеб. – М.: Машиностроение, 2006. – 336 с.

126 Шеркунов В.Г., Семашко М.Ю., Чигинцев П.А. и др. Экспериментальное исследование металлических образцов, подвергнутых интенсивной пластической деформации // Обработка сплошных и слоистых материалов. – 2014. – №1. – С. 11-19.

127 Харламов А.А. и др. Моделирование обработки металлов давлением с помощью комплекса DEFORM // САПР и графика. – 2005. – №5. – С. 54-57.

128 Проскуряков Ю.Г., Сайко И.Б., Заикин В.А. Площадь контакта деформирующего элемента с обрабатываемой деталью при ППД // Завод-ВТУЗ - производству: сб. науч. тр. – Р-на-Д., 1976. – Вып. 6. – С. 53-88.

129 Резников А.Н. Теплофизика процессов механической обработки материалов: монография. – М.: Машиностроение, 1981. – 279 с.

130 Резников А.Н., Барац Я.И. Применение алмазного выглаживания для отделочно-упрочняющей обработки // Вестник машиностроения. – 1970. – №1. – С. 15-17.

131 Кузнецов В.А., Сазонов Д.А., Смирнов А.В. Моделирование контакта инструмента с деталью при обработке выглаживанием в программной среде Компас 3Д // Известия Московского государственного технического университета МАМИ. – 2011. – №2. – С. 144-149.

132 Кузнецов В. Системный анализ и моделирование методов обработки: монография. – Саарбрюккен: LAP LAMBERT AP, 2013. – 301 с.

133 Джамбруно М. Трёхмерная графика и анимация / пер. с англ. – М.: Вильямс, 2003. – 640 с.

134 Херн Д., Бейкер М.П. Компьютерная графика и стандарт OpenGL / пер. с англ. – М., 2005. – 1158 с.

135 Иванов В.П., Батраков А.С. Трёхмерная компьютерная графика. – М., 1995. – 223 с.

136 Иванов К.М. и др. Исследование технологических возможностей поперечного выдавливания методом конечных элементов // Металлообработка. – 2001. – №2. – С. 24-27.

137 Иванов К.М., Шевченко В.С., Юргенсом Э.Е. Метод конечных элементов в технологических задачах ОМД: учеб. пос. – СПб.: Ин-т машиностроения, 2000. – 217 с.

138 Шмыков А.А. Справочник термиста. – М.: Машпв, 1956. – 337 с.

139 Семашко М.Ю., Шеркунов В.Г., Чигинцев П.А. Моделирование в среде Deform микроструктуры металлических образцов, подвергнутых интенсивной пластической деформации // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2013. – №1(41). – С. 57-61.

140 Грузинов В.П., Грибов В.Д. Экономика предприятия: учеб. пос. – М.: Финансы и статистика, 2000. – 208 с.

141 Федосеева В.А. Экономика организации: учеб. пос. – Пермь, 2018. – 170 с.

142 Складенко В.К., Прудников В.М. Экономика предприятия: учеб. – М.: ИНФРА-М, 2006. – 528 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Патент на полезную модель

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ

РЕСПУБЛИКА КАЗАХСТАН

REPUBLIC OF KAZAKHSTAN

ПАТЕНТ
PATENT

№ 7082

ПАЙДАЛЫ МОДЕЛЬГЕ / НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ / FOR UTILITY MODEL



(21) 2022/0012.2

(22) 12.01.2022

(45) 06.05.2022

(54) Гидравликалық цилиндрдің ішкі бетін өңдеуге арналған құрама реткер
Комбинированная развертка для обработки внутренней поверхности гидроцилиндров
Combined reamer for processing the interior surface of hydraulic cylinders

(73) Мухамадеева Раиля Минибулатовна (KZ)
Mukhamadeyeva Railya Minibulatovna (KZ)

(72) Мухамадеева Раиля Минибулатовна (KZ) Mukhamadeyeva Railya Minibulatovna (KZ)
Берикбаева Меруерт Амирхановна (KZ) Berikbaeva Meruert Amirkhanovna (KZ)



ЭЦҚ қол қойылды
Подписано ЭЦП
Signed with EDS

Е. Оспанов
Е. Оспанов
Y. Osranov

«Ұлттық зияткерлік меншік институты» РМҚ директоры
Директор РГП «Национальный институт интеллектуальной собственности»
Director of RSE «National institute of intellectual property»

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

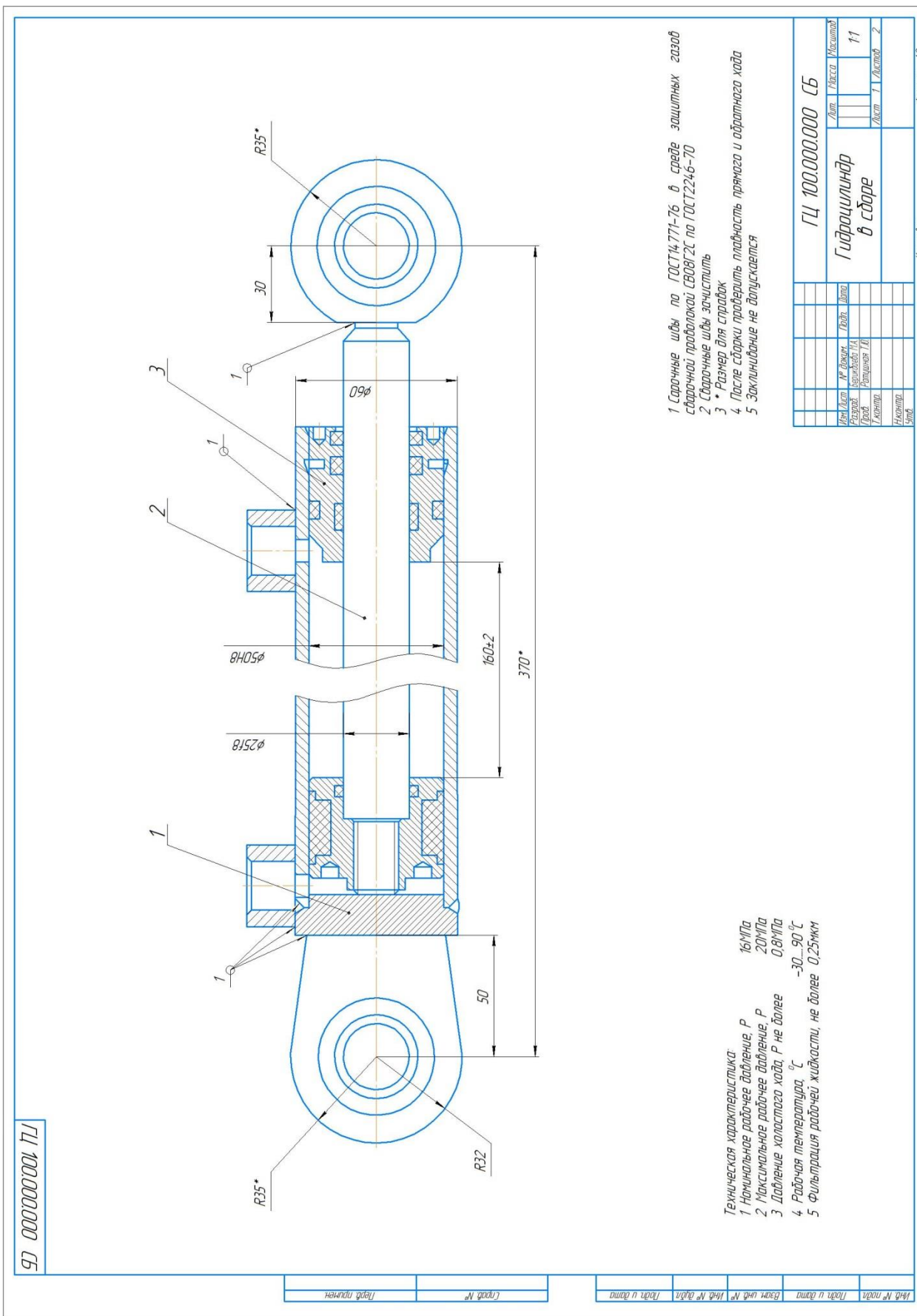


Рисунок Б.1 – Чертежи гидравлического цилиндра, лист 1

Инв. № подл.	Изм. / лист	№ докум.	Подп.	Дата	ГЦ 100.000.000 СБ	Лит.	Лист	Листов	Инв. № инв. №	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подп. и дата	Справ. №	Перв. примен.	Формат	Зона	Поз.	Обозначение	Наименование	Кол.	Примечание	
																				<u>Документация</u>		
																			ГЦ100.000.000 СБ	Гидроцилиндр в сборе		
																				<u>Сборочные единицы</u>		
																			ГЦ100.100.000 СБ	Гидроцилиндр	1	
																			ГЦ100.200.000 СБ	Шток гидроцилиндра	1	
																			ГЦ100.300.000 СБ	Букса	1	

Копировал

Формат А4

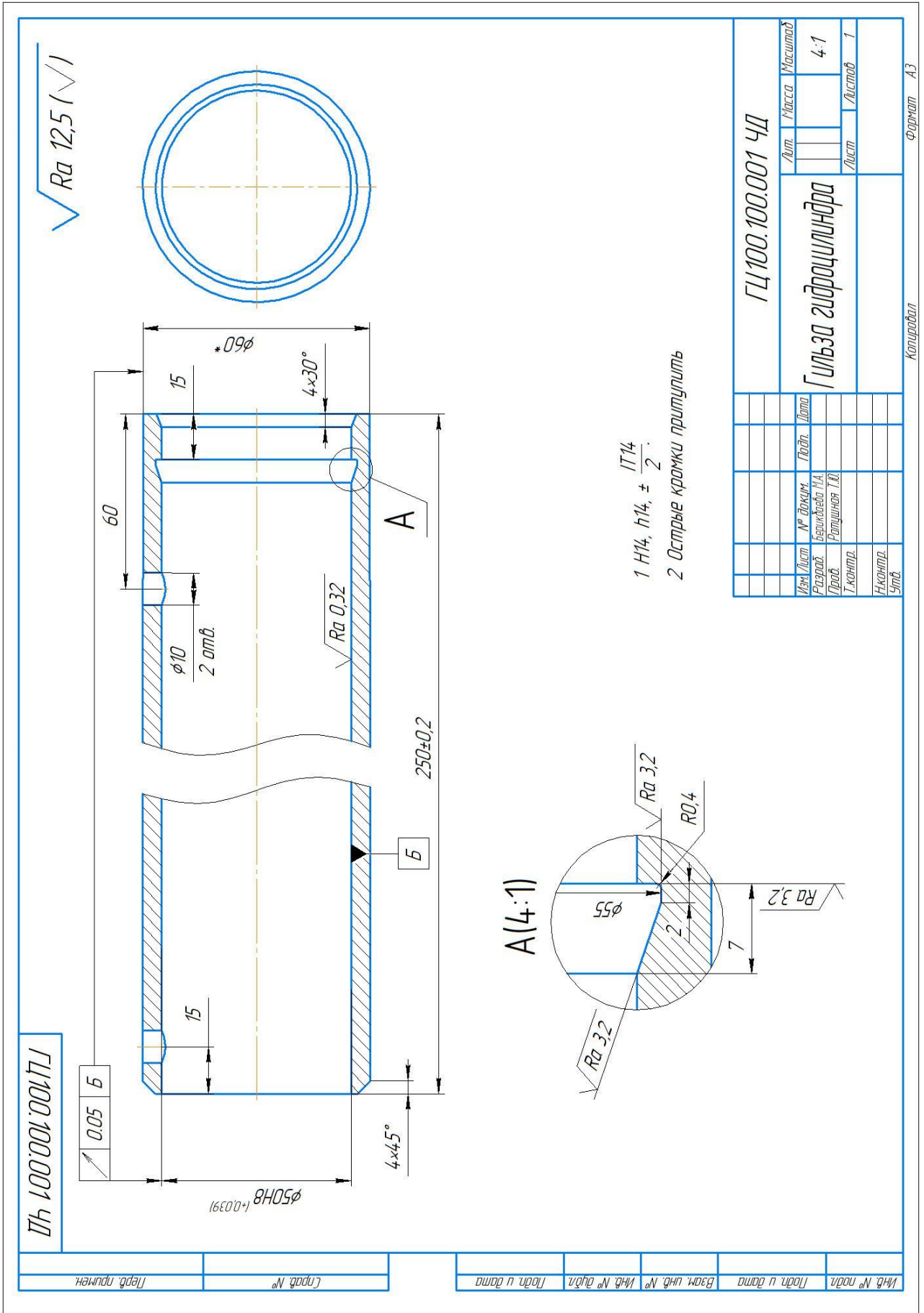


Рисунок Б.1, лист 3

ПРИЛОЖЕНИЕ В

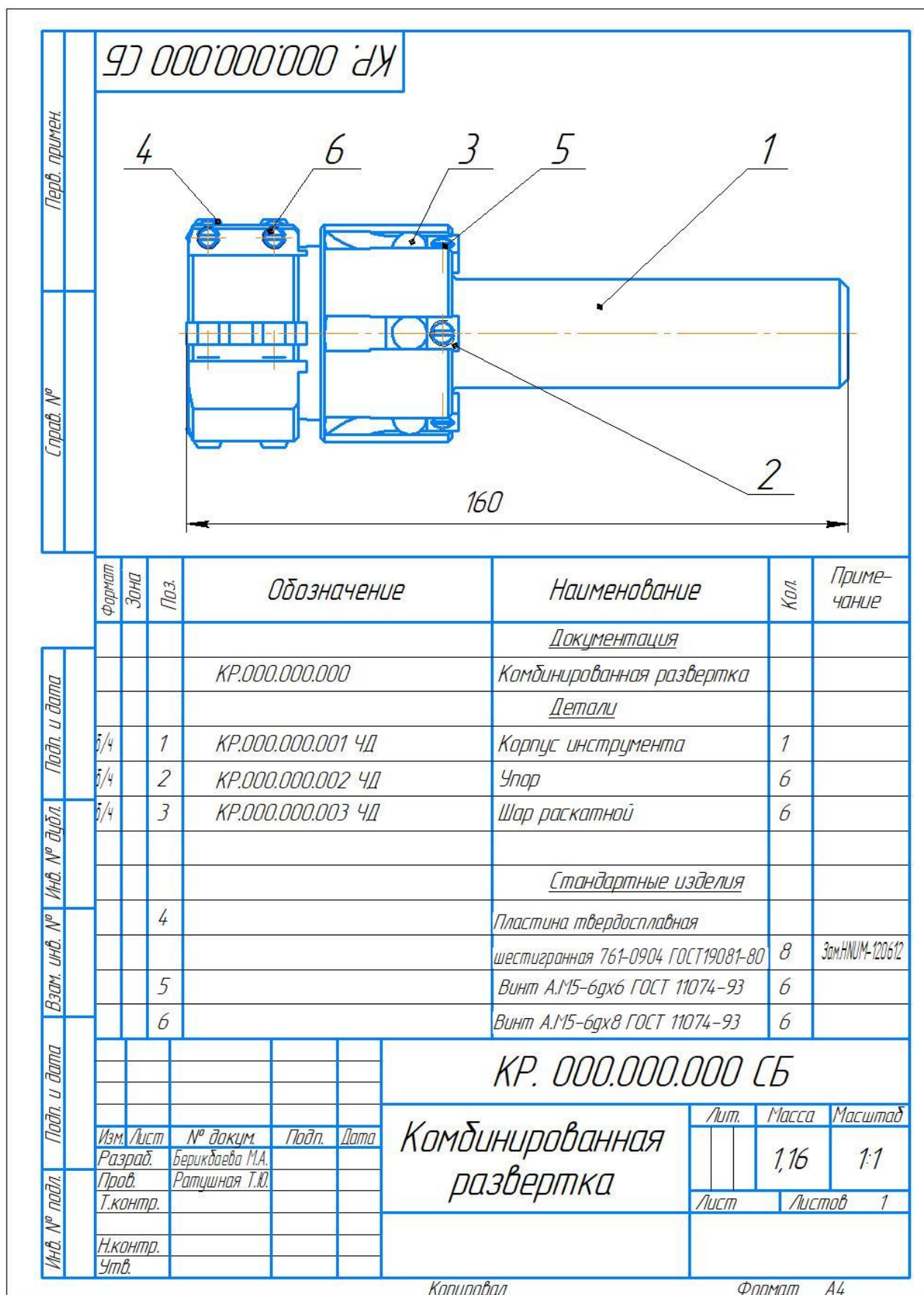


Рисунок В.1 – Конструкторская документация комбинированной развертки

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Выбор технологического оборудования и инструмента

Таблица Г.1 – Выбор технологического оборудования и средств технологического оснащения

№ операции	Название операции	Модель оборудования	Приспособление
Рабочая часть			
005	Заготовительная	Горизонтально-ленточная пила UE-330А	Тиски самоцентрирующиеся с призматическими губками, ГОСТ 12195-66
010	Токарная	Токарный станок 16К20	Трёхкулачковый патрон, ГОСТ 2675-80
015	Токарная	Токарный станок 16К20	Трёхкулачковый патрон,
020	Токарная	Токарный станок 16К20	ГОСТ 2675-80
025	Токарная	Токарный станок 16К20	Трёхкулачковый патрон,
030	Токарная	Токарный станок 16К20	ГОСТ 2675-80
035	Фрезерная	Фрезерный станок STALEX BF50PF	Трёхкулачковый патрон, ГОСТ 2675-80, Делительная головка Metal Master ПДГ 125М
040	Фрезерная	Фрезерный станок STALEX BF50PF	Трёхкулачковый патрон, ГОСТ 2675-80, Делительная головка Metal Master ПДГ 125М
045	Фрезерная	Фрезерный станок STALEX BF50PF	Трёхкулачковый патрон, ГОСТ 2675-80, Делительная головка Metal Master ПДГ 125М
050	Сверлильная	Сверлильный станок STALEX HDP-16	Призма опорные ГОСТ 12195-66 7033-0037
055	Слесарная		Призма опорная ГОСТ 12195-66 7033-0037
Хвостовая часть			
005	Заготовительная	Горизонтально-ленточная пила UE-330А	Тиски самоцентрирующиеся с призматическими губками, ГОСТ 12195-66
010	Токарная	Токарный станок 16К20	Трёхкулачковый патрон, ГОСТ 2675-80
Фреза (Сборка)			
005	Сварка	Сварочная машина МСМУ-150	
010	Отжиг		
015	Контрольная		
020	Токарная	Токарный станок 16К20	Трёхкулачковый патрон, ГОСТ 2675-80
025	Термическая	Твердомер МЕТ-УДА	
030	Сборочная		
035	Контрольная		

Таблица Г.1 – Выбор режущего и мерительного инструмента

№ операции	Название операции	Модель оборудования	Приспособление
Рабочая часть			
005	Заготовительная	Пила MIKUS BIFLEX M42 № 526	Линейка 0-300 мм, ГОСТ 427-75
010	Токарная	Резец проходной, ГОСТ 18879-73 пластина 4015PF	Штангенциркуль ШЦ1-280-0,1, ГОСТ 166-89
015	Токарная	Резец проходной, ГОСТ 18874-73 из быстрорежущей стали 2120-0502	Штангенциркуль ШЦ11-250-0.05, ГОСТ 166-89
020	Токарная	Резец отрезной, ГОСТ 18879-73 пластина 4015PF	Штангенциркуль ШЦ1-280-0,1, ГОСТ 166-89
025	Токарная	Резец проходной, ГОСТ 18879-73 пластина 4015PF	Штангенциркуль ШЦ1-280-0,1, ГОСТ 166-89
030	Токарная	Резец проходной, ГОСТ 18879-73 пластина 4015PF	Штангенциркуль ШЦ1-280-0,1, ГОСТ 166-89
035	Фрезерная	Фреза торцевая насадная PE05.17A22.063.06	Штангенциркуль ШЦ1-280-0,1, ГОСТ 166-89
040	Фрезерная	Фреза трёхсторонняя дисковая специальная	Штангенциркуль ШЦ1-280-0,1, ГОСТ 166-89
045	Фрезерная	Фреза грибковая специальная	Штангенциркуль ШЦ1-280-0,1, ГОСТ 166-89
050	Сверлильная	Сверло специальное.	Штангенциркуль ШЦ1-280-0,1, ГОСТ 166-89
055	Слесарная	Метчик М6, ГОСТ 27101-86	Калибр резьбовой М6-6Н
Хвостовая часть			
005	Заготовительная	Пила MIKUS BIFLEX M42 № 526	Линейка 0-300 мм, ГОСТ 427-75
010	Токарная	Резец проходной, ГОСТ 18879-73 пластина 4015PF	Штангенциркуль ШЦ11-250-0.05, ГОСТ 166-89
Фреза (Сборка)			
005	Сварка		
010	Отжиг		
015	Контрольная		Штангенциркуль ШЦ1-280-0,1, ГОСТ 166-89
020	Токарная	Резец проходной, ГОСТ 18879-73 пластина 4015PF	Штангенциркуль ШЦ1-280-0,1, ГОСТ 166-89
025	Термическая		Динамический датчик Д
030	Сборочная	Слесарный инструмент	
035	Контрольная		Микрометр МКЦ-25 0,001 КЛБ

ПРИЛОЖЕНИЕ Д

Последовательность обработки поверхностей корпуса инструмента

Таблица Д.1 – Технологическая последовательность механической обработки поверхностей (технологический маршрут и эскизы изготовления комбинированного инструмента)

Номер, наименование операции	Станок	Операционный эскиз	Содержание операции
1	2	3	4
Рабочая часть			
005 Заготовительная	Горизонтально-ленточная пила UE-330A		Отрезать выдерживая размер
010 Токарная	16K20		Точить шейку и торец, выдерживая размер
015 Токарная	16K20		Точить поверхность, выдерживая размер
020 Токарная	16K20		Точить канавку рабочей части развертки, выдерживая размеры согласно эскизу
025 Токарная	16K20		Точить рабочую часть развертки, выдерживая размеры согласно эскизу
030 Токарная	16K20		Точить рабочую часть развертки, выдерживая размеры согласно эскизу

Продолжение таблицы Д.1

1	2	3	4
035 Фрезерная	STALEX BF50PF		Фрезеровать 4 лыски согласно эскизу
040 Фрезерная	STALEX BF50PF		Фрезеровать 4 паза согласно эскизу
045 Фрезерная	STALEX BF50PF		Фрезеровать 6 пазов согласно эскизу
050 Сверлильная	STALEX HDP- 16		Сверлить 8 отверстий согласно эскизу
055 Слесарная			Нарезать резьбу М6
Хвостовая часть			
005 Заготовительна я	Горизонтально- ленточная пила UE-330A		Отрезать выдерживая размер
010 Токарная	16K20		Точить шейку и торец выдерживая размер
Комбинированная развертка (сборка)			

Продолжение таблицы Д.1

1	2	3	4
005 Сварка	Сварочная машина МСМУ-150		Сварить заготовки встык
010 Термическая	Печь для термической обработки	Отжиг	Отжечь заготовку
015 Контрольная			Контроль твердости
020 Токарная	16К20		Точить грат
025 Термическая	Печь для термической обработки		
030 Сборочная	Верстак слесарный		Собрать детали согласно сборочного чертежа
035 Контрольная	Стол ОТК		Контролировать все размеры согласно чертежа

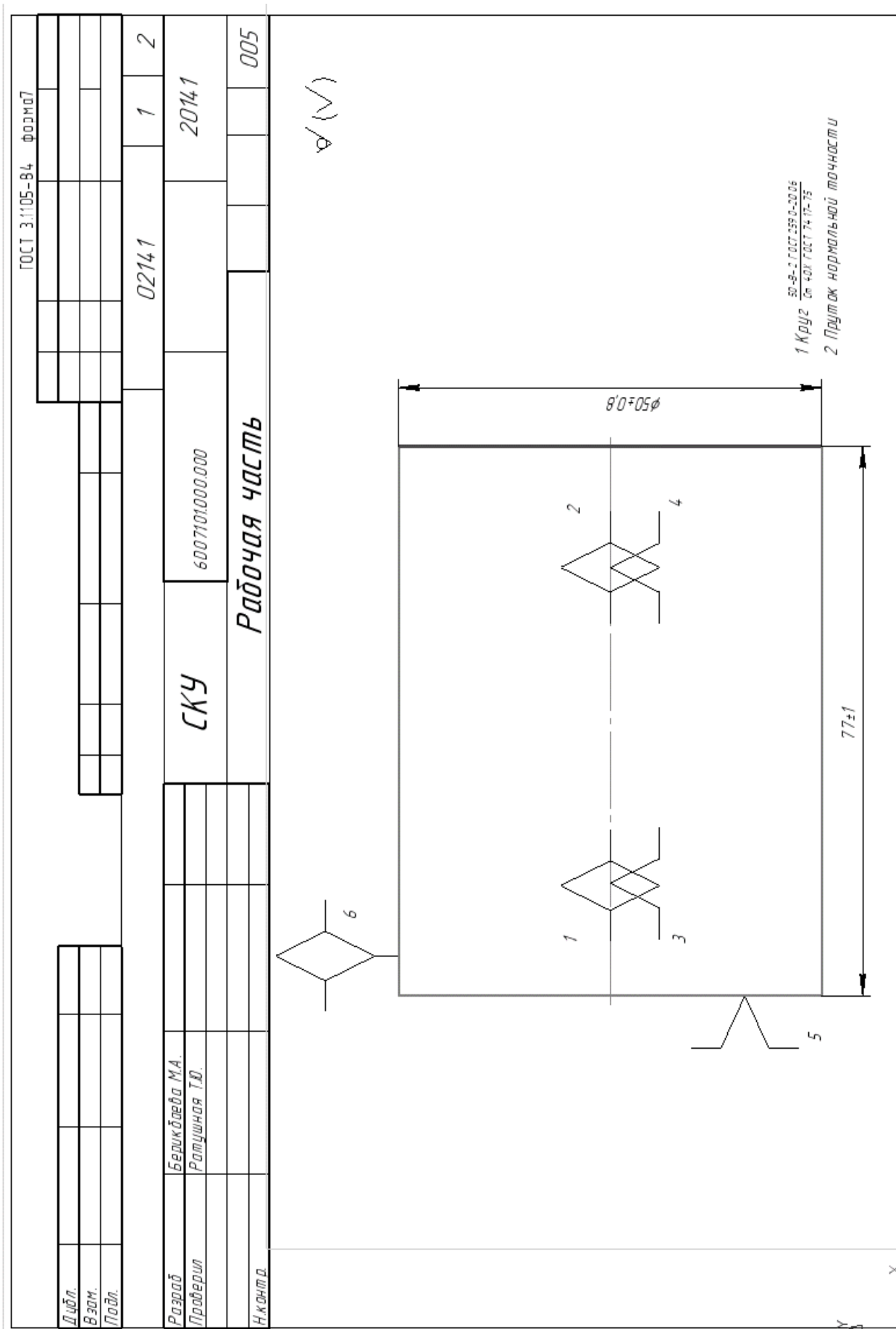


Рисунок Д.1 – Карта эскизов изготовления комбинированного инструмента,
лист 1

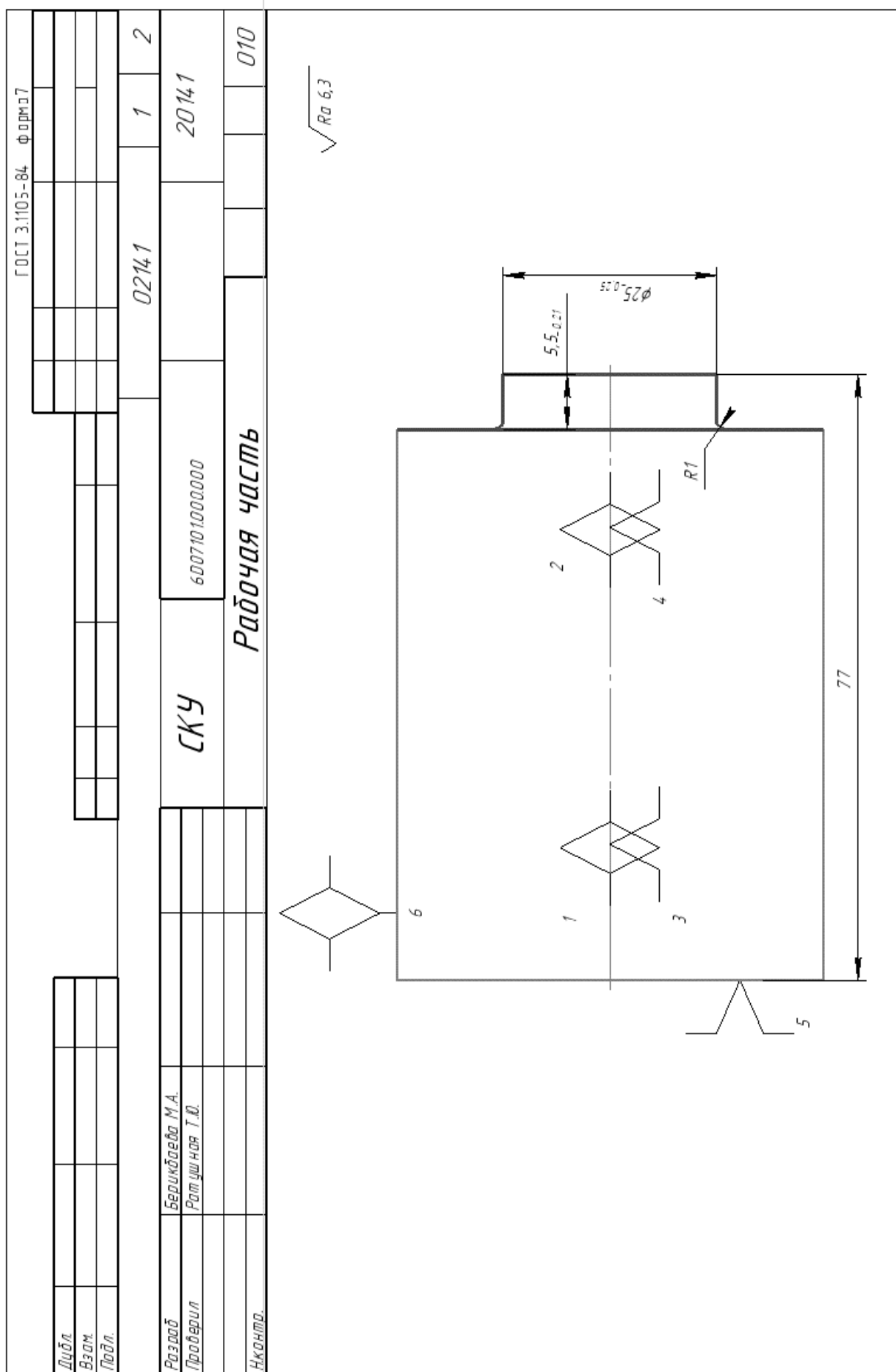


Рисунок Д.1, лист 2

ГОСТ 3.1105-84		Формат 7	
Добл.			
Взм.			
Побл.			
		02141	1 1 2
Разраб	Берикбаева М.А.	СКУ	6007101000.000
Проверил	Ратушная Т.Ю.		
		Рабочая часть	
Н.контр.			015

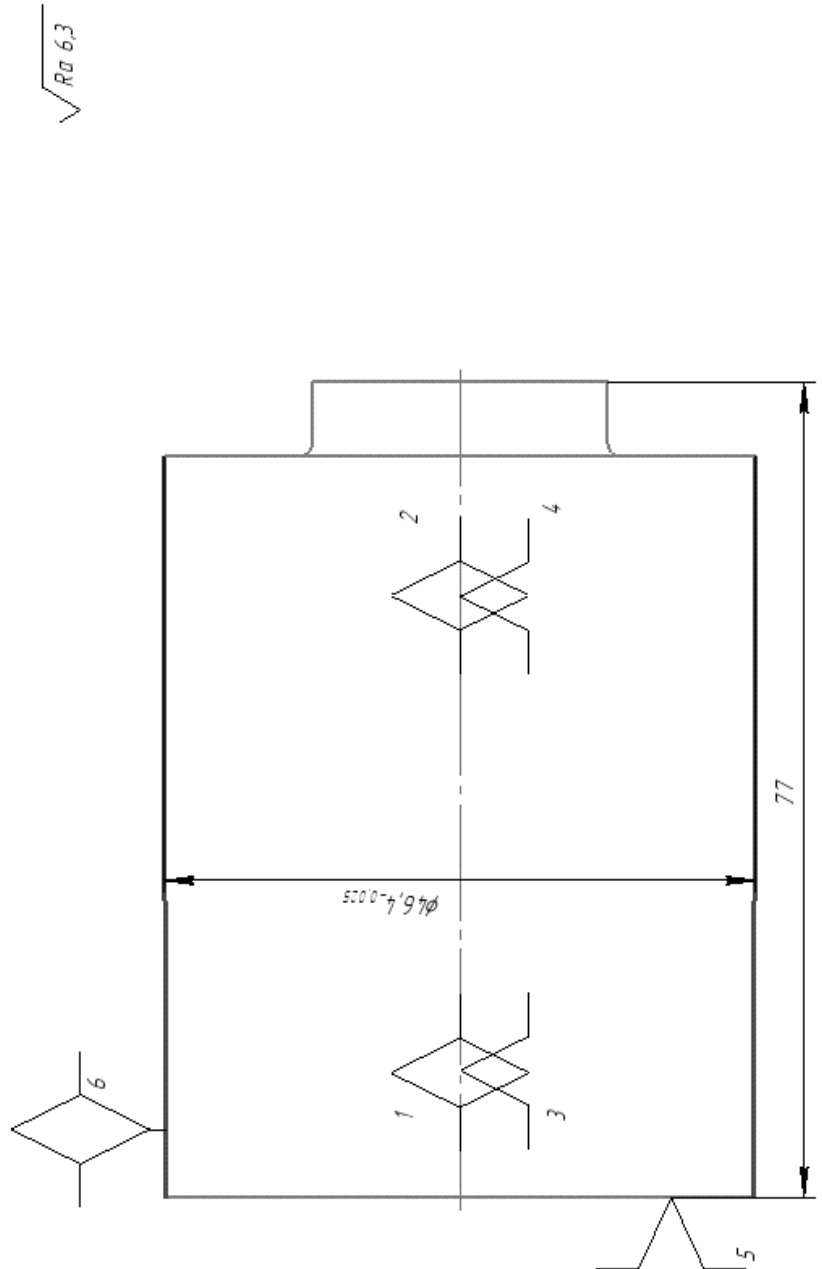


Рисунок Д.1, лист 3

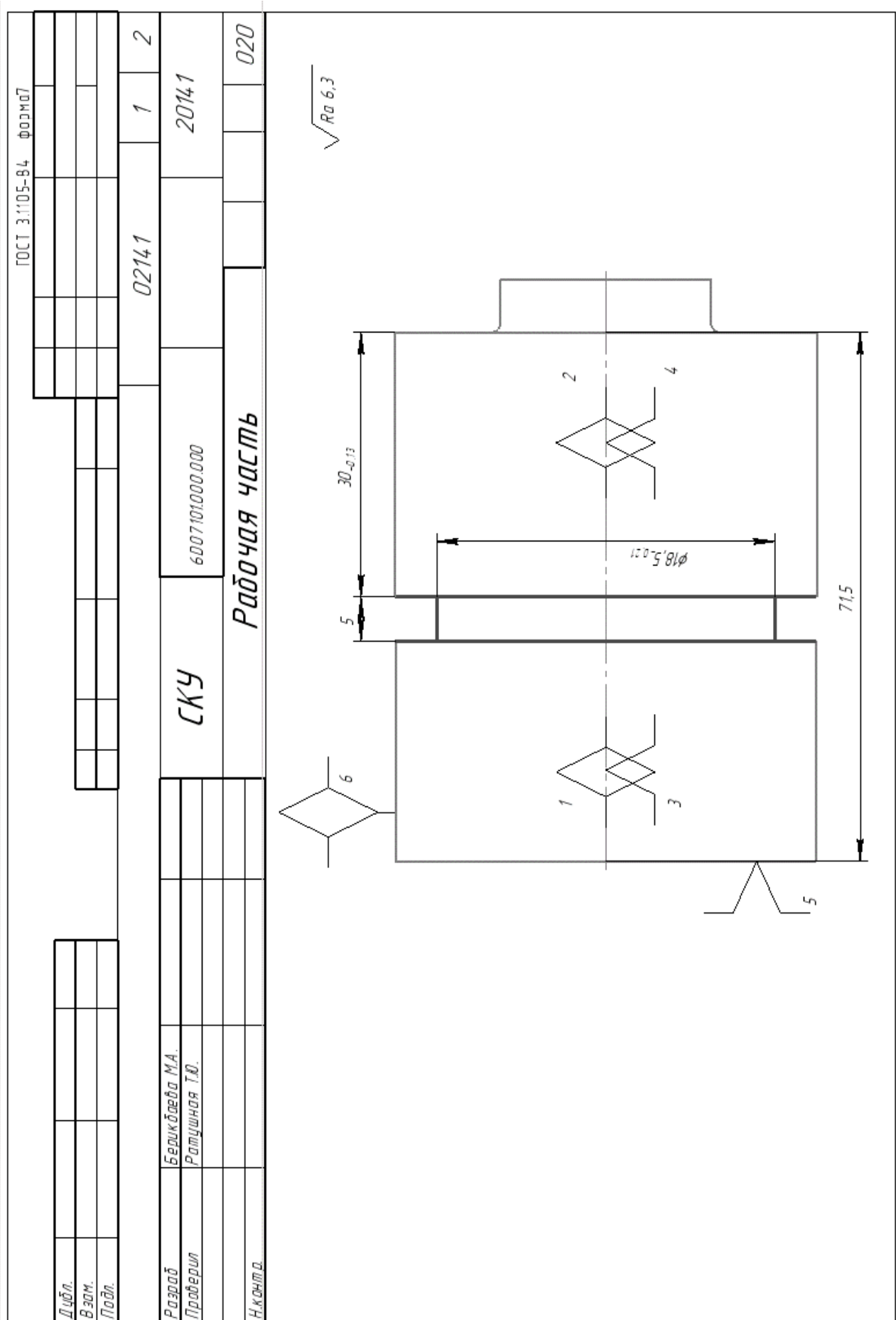


Рисунок Д.1, лист 4

ГОСТ 3.1105-84		Формат	
Добл.			
Взм.			
Подл.			
		02141	1 2
Разраб	Бериклава М.А.	6007101000.000	20141
Проверил	Ратчиная Т.Ю.		
		Рабочая часть	025
И.контр.			

$\sqrt{Ra 6,3}$

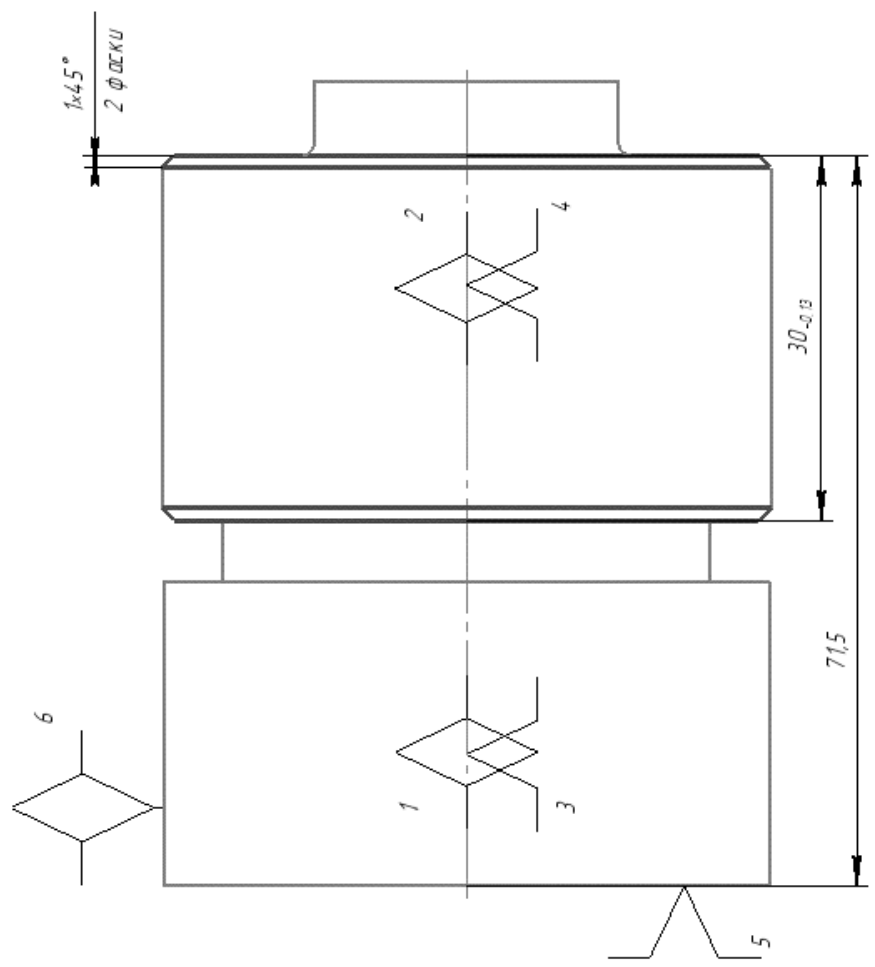


Рисунок Д.1, лист 5

ГОСТ 3.1105-84		Формат	
Дибл.			
Взам.			
Лабл.			
		02141	1 1 2
Разраб.	Берлибаева М.А.		20141
Проверил	Рагущина Т.Ю.	6007101.000.000	
Исполн.		Рабочая часть	
			030

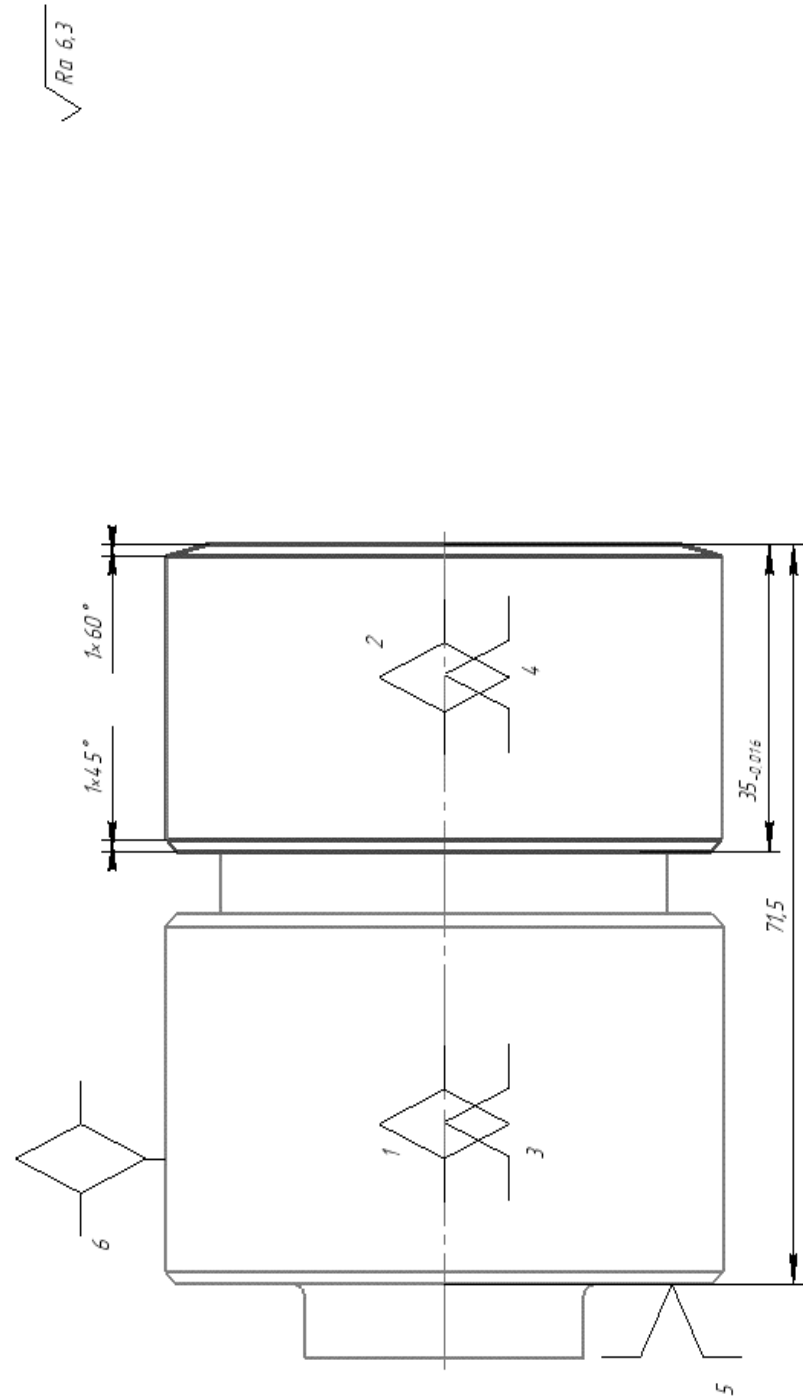


Рисунок Д.1, лист 6

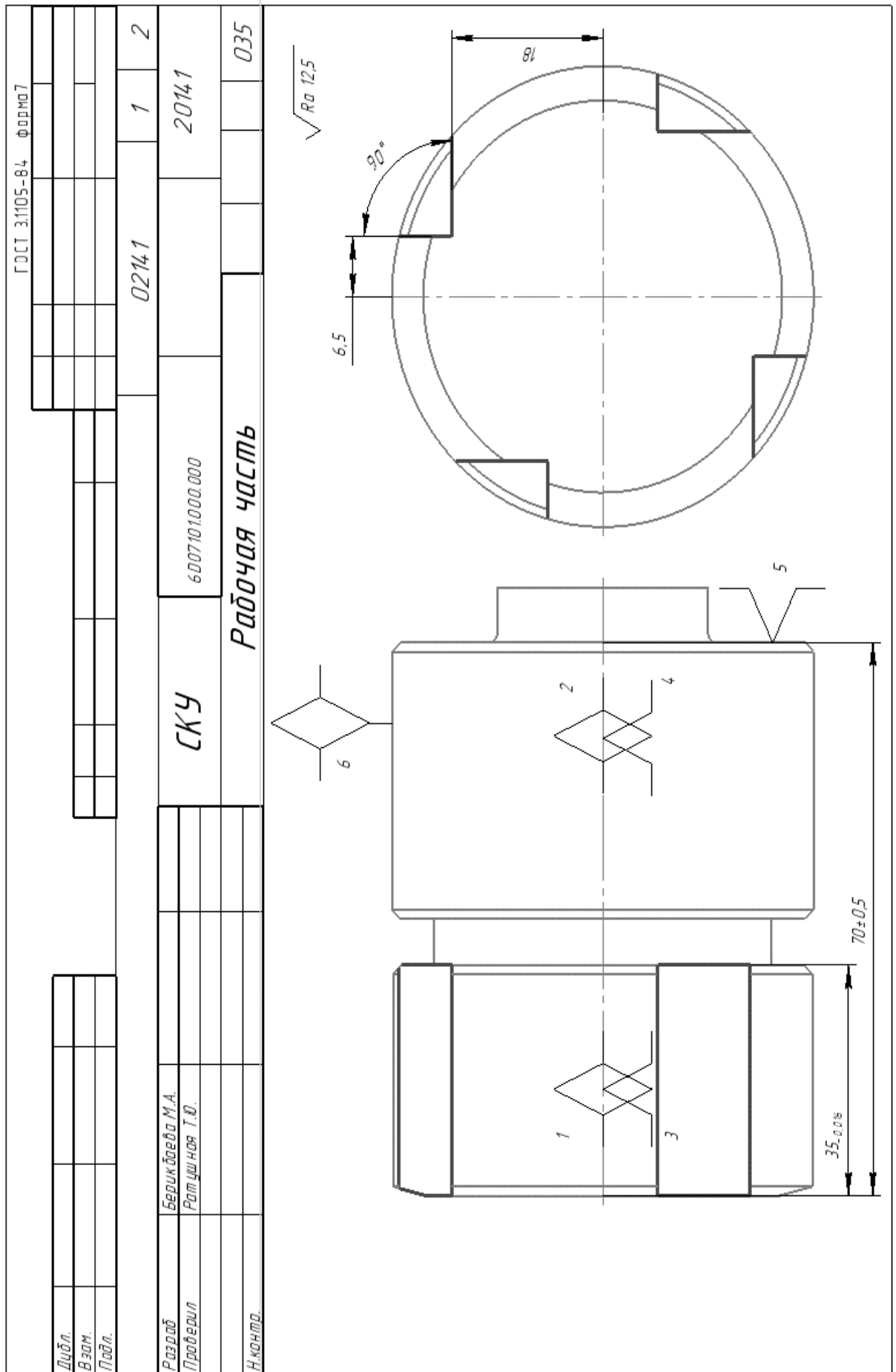


Рисунок Д.1, лист 7

ГОСТ 3.1105-84 ФОРМАТ			
Дибл.			
Взам.			
Подл.			
		02141	1 2
Разраб	Берикбаева М.А.		20141
Проверил	Ратушная Т.Ю.	60071010000000	
И.контр.		Рабочая часть	
			040

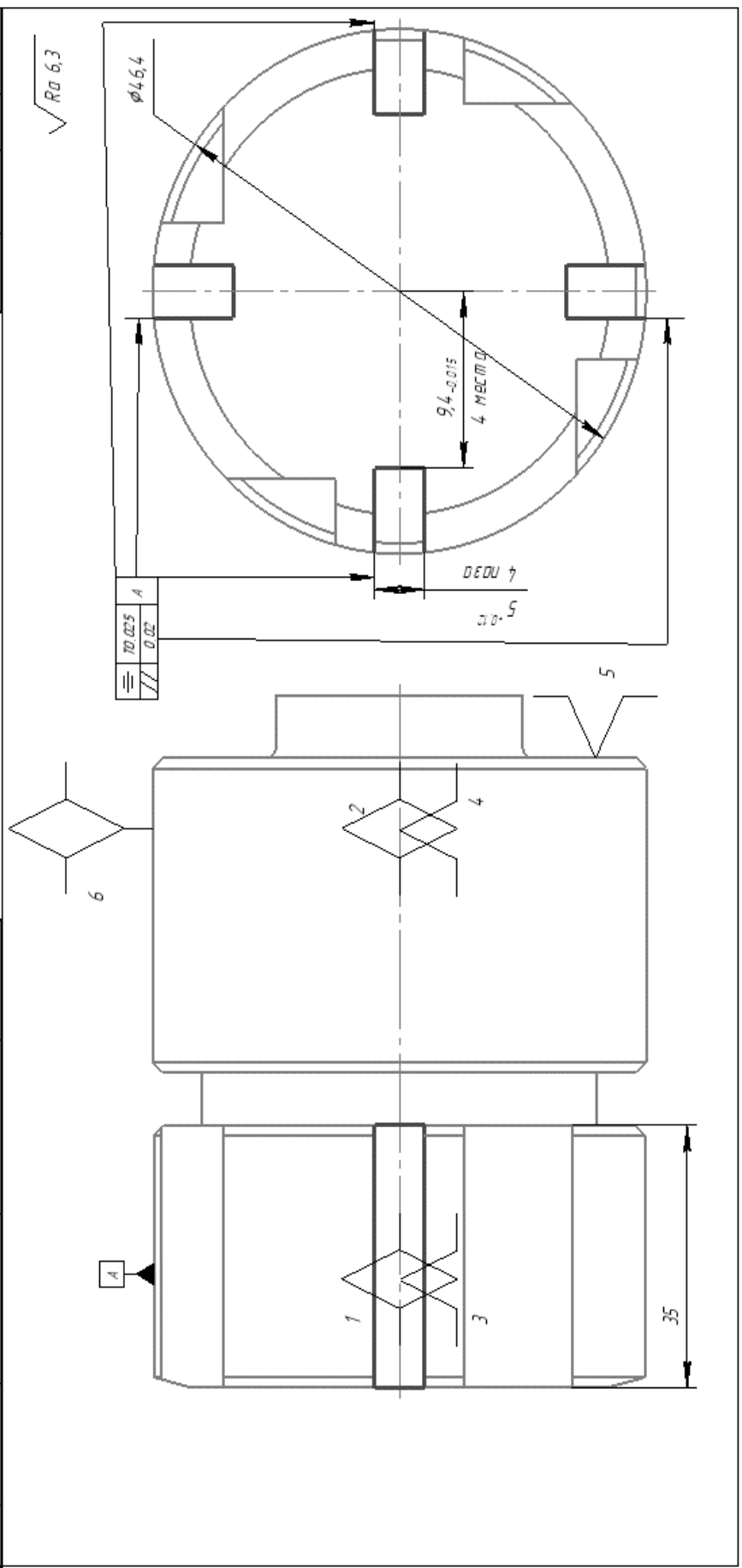


Рисунок Д.1, лист 8

ГОСТ 3.1105-84 ФОРМАТ		02141		1	2
Дизл.					
Взам.					
Подл.					
Разраб	Берикдлава М.А.	СКУ	6007101.000.000	2014 1	
Проверил	Ратушная Т.Ю.				
Н.контр.		Рабочая часть			045

√ Ra 6,3

(1:2)

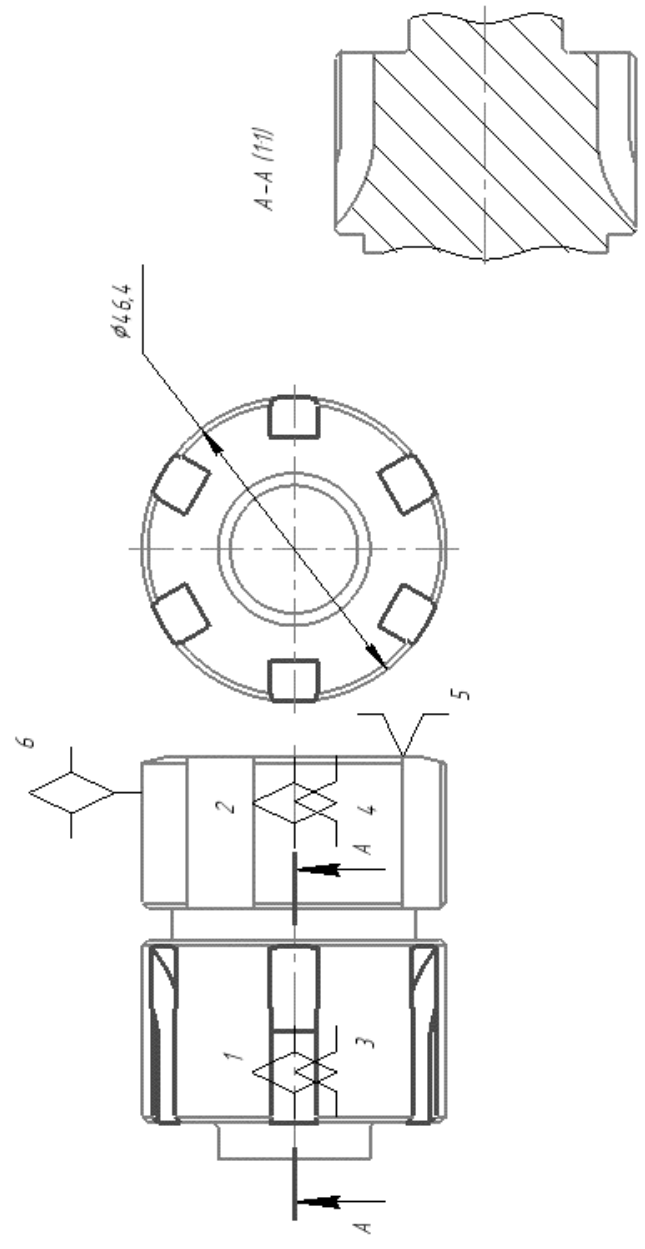


Рисунок Д.1, лист 9

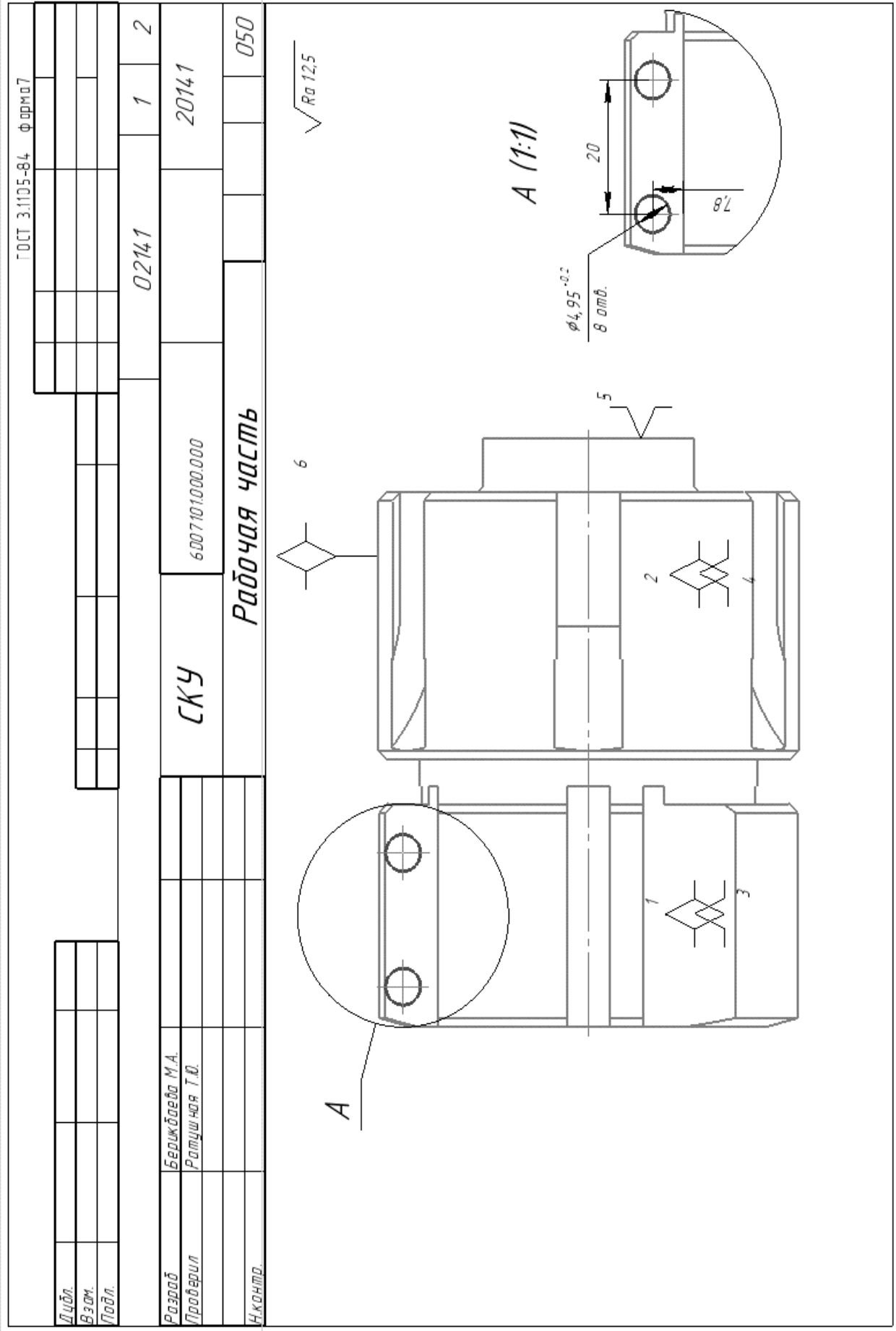


Рисунок Д.1, лист 10

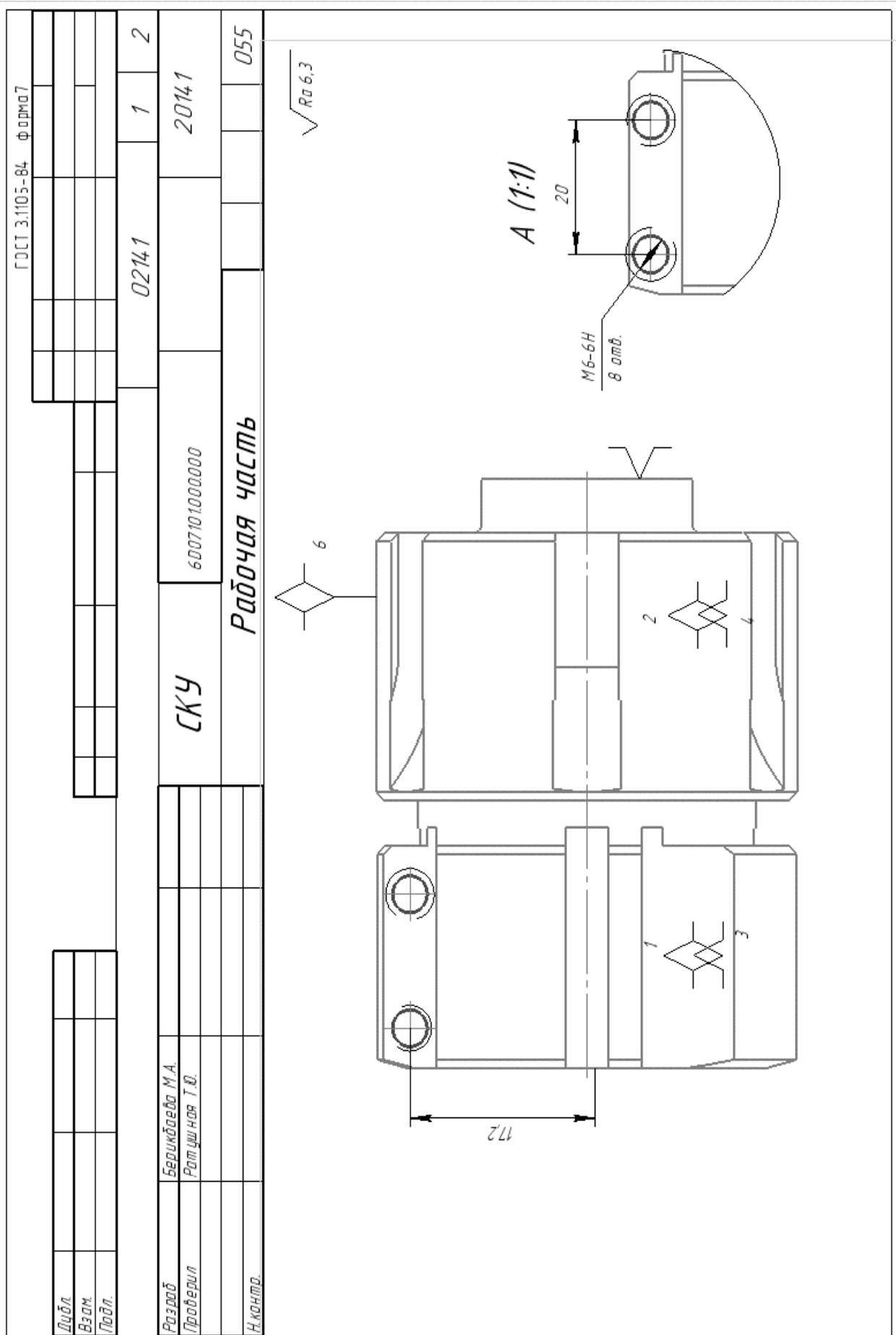


Рисунок Д.1, лист 11

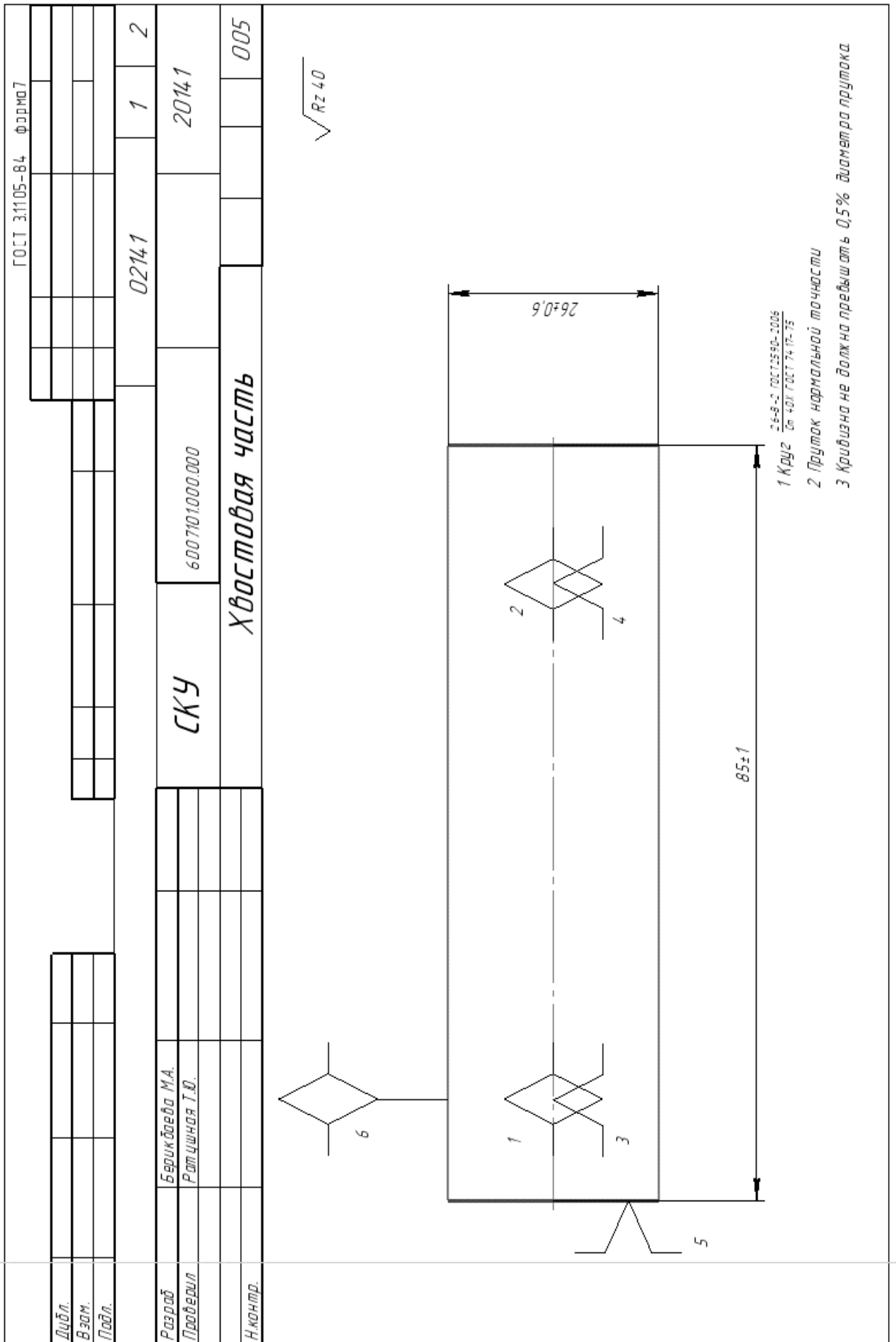


Рисунок Д.1, лист 12

ГОСТ 3.1105-84 форма 7					
Дцдл.					
Взам.					
Подл.					
Разраб	Бершбаева М.А.	02141		1	2
Проверил	Ратцшная Т.Ю.	СКУ		20141	
		6007101000.000			
Н.контр.		Хвостовая часть		010	

$\sqrt{Ra 6,3}$

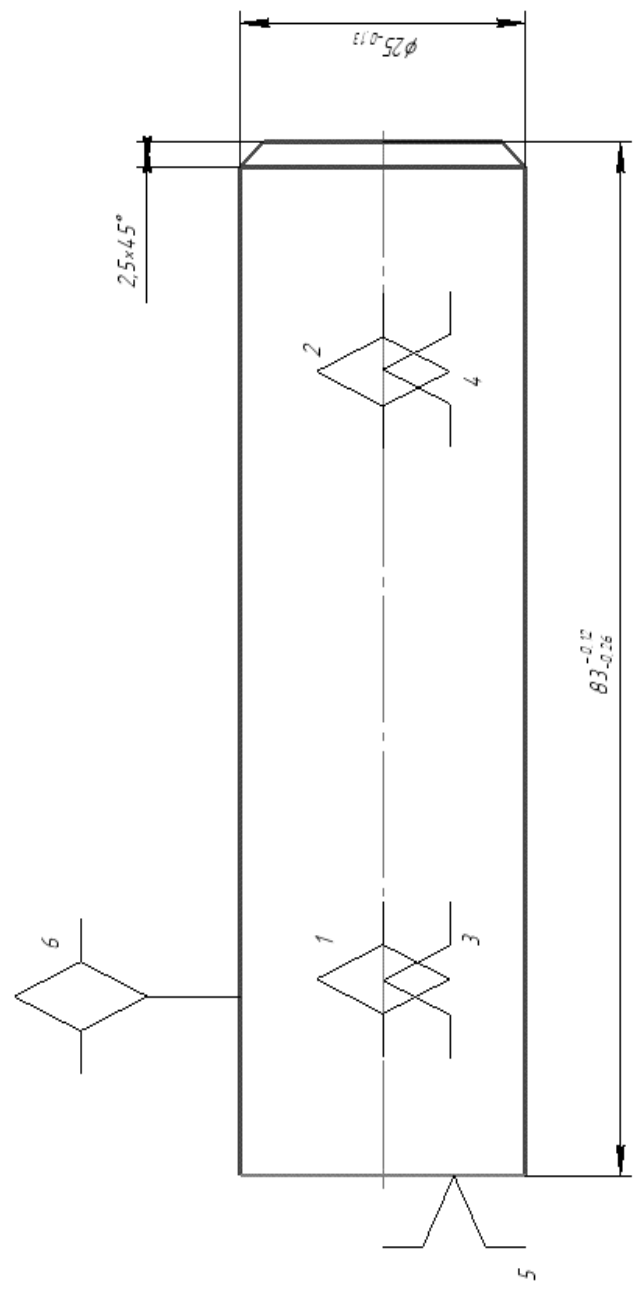


Рисунок Д.1, лист 13

ГОСТ 3.1105-84 ФОРМАТ		1	2
Испол.			
Взам.			
Подл.			
Разработ	Берлибаева М.А.	СКУ	
Проверил	Рагущина Т.Ю.	6007101000000	
Н.контр.		Корпус инструмента	
			005

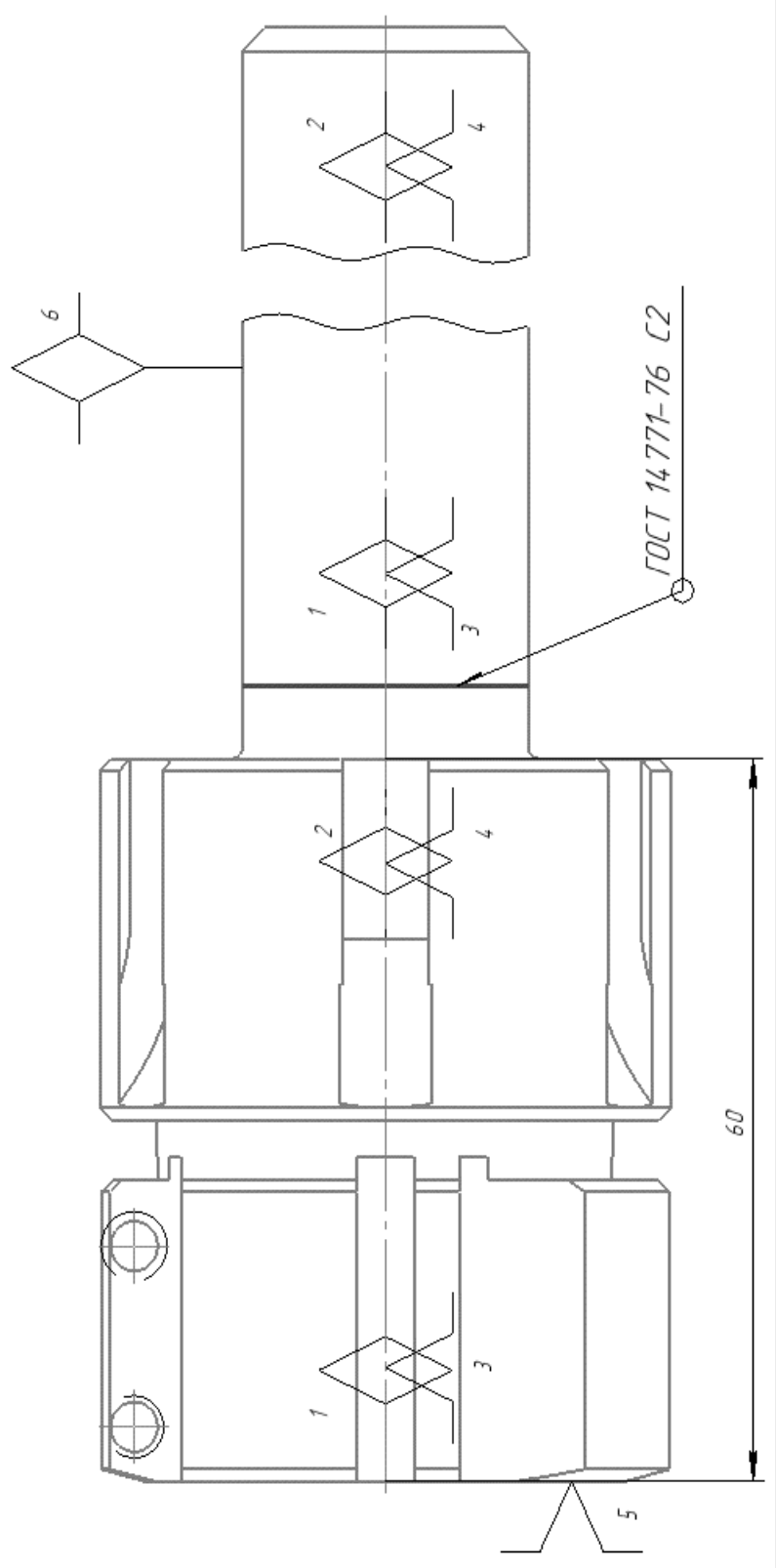


Рисунок Д.1, лист 14

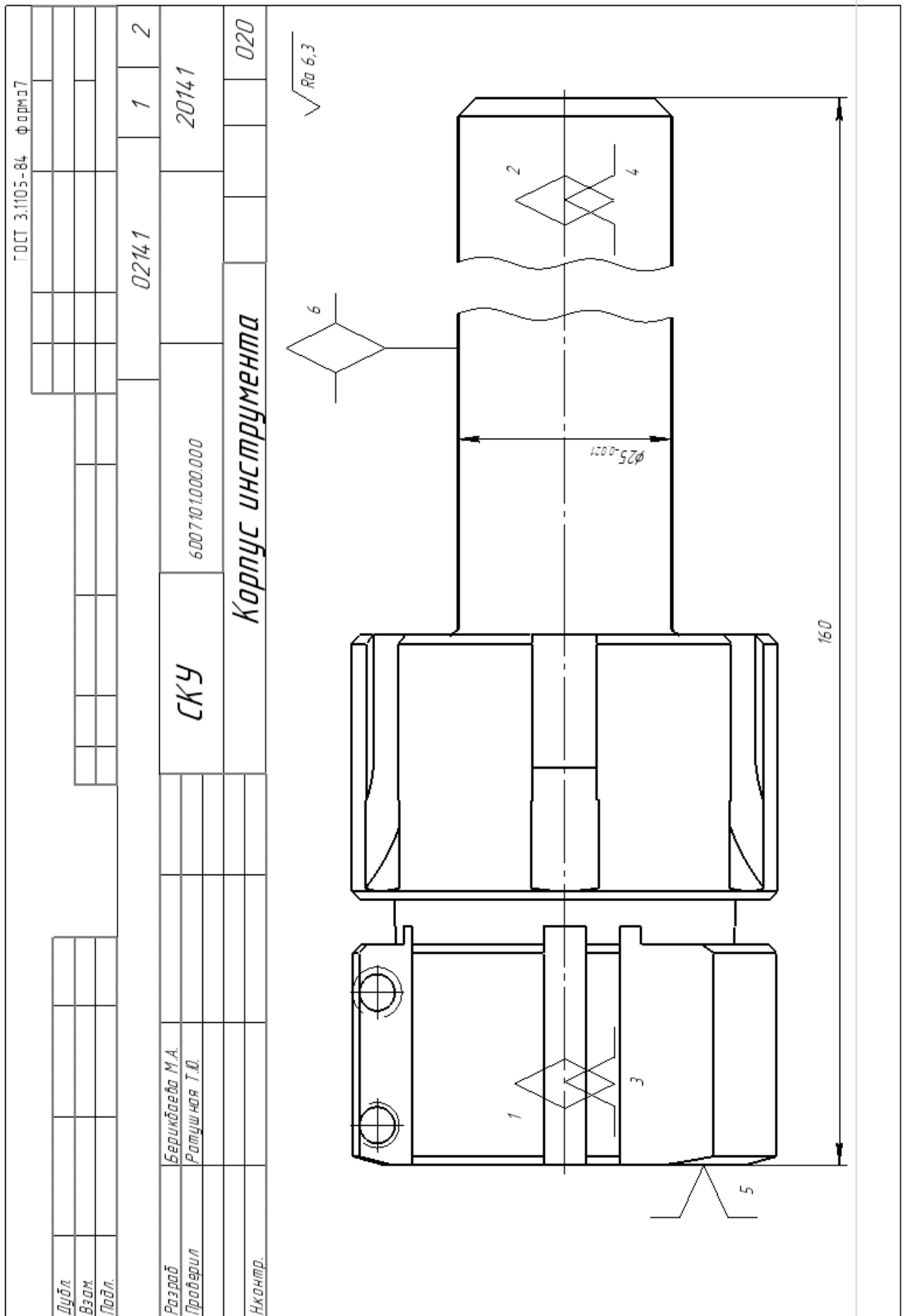


Рисунок Д.1, лист 15

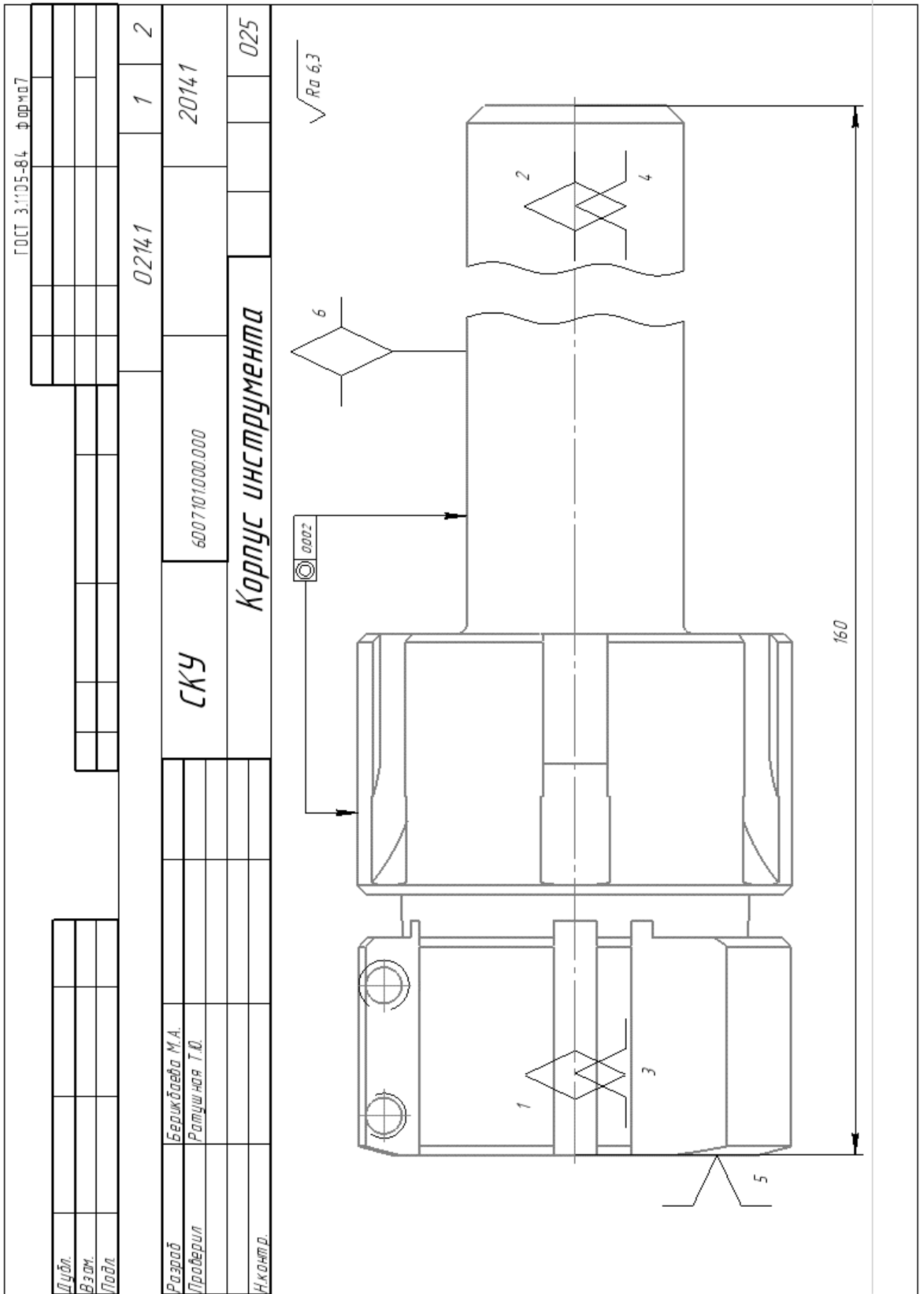


Рисунок Д.1, лист 16

ГОСТ 3.1105-84 Формат 7											
<i>Дубль</i>											
<i>Взам.</i>											
<i>Подл.</i>											
				02141		1		2			
<i>Разработ</i>		СКУ		6007101000000		20141					
<i>Проверил</i>	Берлибаева М.А. Ротчинова Т.Ю.										
<i>Начинтр.</i>		Корпус инструмента									

Рисунок Д.1, лист 17