

**Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего
образования
«Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»**

На правах рукописи

Мартюшова Анастасия Алексеевна

**ПОВЫШЕНИЕ РЕСУРСА АЛМАЗНЫХ ДОЛОТ НА ОСНОВЕ
СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ИХ ИЗГОТОВЛЕНИЯ**

Специальность 2.8.8 – «Геотехнология, горные машины»

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель: д.т.н., профессор Мнацаканян Виктория Умедовна

Москва, 2023

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
Глава 1 Анализ состояния проблемы, обоснование цели исследований	11
1.1 Служебное назначение, классификация и сравнительная характеристика буровых долот.....	11
1.2 Анализ конструкции и технологий изготовления алмазных долот	16
1.3 Анализ причин износа алмазного долота	28
1.4 Обоснование цели и задач исследования	34
Глава 2 Исследование влияния качества изготовления на работоспособность алмазного долота.....	37
2.1 Анализ механики процесса резания-скалывания PDC- резцом	37
2.2 Влияние позиционной точности режущих элементов на баланс сил, воздействующих на PDC-резец	42
2.3. Влияние качества изготовления на ресурс алмазного долота	47
2.4 Выводы по главе 2.....	57
Глава 3 Технологическое обеспечение качества алмазного долота	58
3.1 Обоснование конструкции алмазного долота для условий автоматизированного производства.....	58
3.2 Количественная оценка технологичности конструкции цельнометаллического корпуса долота	61
3.3 Многоуровневая оценка технологичности конструкции долота	64
3.4 Совершенствование технологического маршрута изготовления алмазного долота с применением высокопроизводительного оборудования.....	83
3.5 Математическое описание формирования позиционной точности обрабатываемых поверхностей корпуса в координатной системе станков.....	92
3.6 Выводы по главе 3.....	96
Глава 4 Повышение ресурса долота на основе обеспечения качества сборки соединений.....	98

4.1 Выявление условий выполнения соединения ниппель - корпус алмазного долота при автоматической сборке	98
4.2 Формирование позиционной точности соединения ниппель-корпус алмазного долота в условиях автоматической сборки	102
4.3 Проработка условий собираемости при автоматической установке ниппеля в корпус долота.....	108
4.4. Уменьшение радиального биения зубков долота путем уменьшения зазора в резбовом соединении корпуса долота и ниппеля	113
4.5 Уменьшение погрешности радиального биения зубков алмазного долота на этапе технологического процесса сборки.....	121
4.6 Выводы по главе 4.....	127
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	128
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	130
ПРИЛОЖЕНИЕ А Рабочие чертежи алмазного долота.....	143
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Документы о практическом использовании результатов ...	147

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. В последнее время алмазные долота, оснащённые PDC-резцами (PolyCrystalline Diamond Compact), широко применяют при разработке открытых и подземных месторождений твёрдых полезных ископаемых для бурения в породах VII - XII категорий по шкале проф. М. М. Протодяконова. Данные инструменты характеризуются высокой стоимостью и трудоемкостью изготовления. В связи с этим к ним предъявляют достаточно жесткие требования по ресурсу и качеству изготовления. Практика применения алмазных долот отечественных и зарубежных производителей демонстрирует весьма высокую стойкость режущей части инструмента. Вместе с тем в ряде случаев производственные данные свидетельствуют о преждевременном выходе из строя дорогостоящего инструмента в связи с возникновением различных повреждений.

Ресурс алмазных долот зависит от целого ряда факторов, воздействующих на буровой инструмент, как на этапах эксплуатации, так и в процессе изготовления. Известно, что технология и качество изготовления во многом определяют эксплуатационные характеристики и надежность изделий горного машиностроения, в том числе и горного инструмента. Применительно к алмазным долотам погрешности изготовления, проявляемые на этапах механической обработки базовых и несущих элементов конструкций, могут вызвать нерегламентированные отклонения от точности положения исполнительных поверхностей инструмента относительно базовых и, в свою очередь, неравномерность нагружения отдельных элементов корпуса и вооружения. При сборке алмазных долот необходимо обеспечить разновысотность посадки зубков, во избежание формирования недопустимого радиального биения, что может привести к неравномерности их нагружения и преждевременной поломке как самих элементов вооружения, так и базовых частей конструкции долот. Наиболее частыми причинами выхода из строя алмазных долот являются выкрашивание режущих кромок с алмазоносным слоем, выпадение самих зубков, вследствие дефектов пайки, а также поломка

лопастей, на которых фиксируют твердосплавное вооружение долот, вызванная остаточными растягивающими напряжениями, возникающими в процессе приварки лопастей к корпусу.

Таким образом, качество изготовления инструмента оказывает существенное влияние на его ресурс. Учитывая высокую трудоемкость изготовления алмазных долот, до 60% которых составляют сборочные операции, работы, проводимые в направлении совершенствования технологии изготовления долот и технологического обеспечения качества инструмента, являются актуальными и имеют важное как научное, так и практическое значение.

Степень научной проработанности темы исследования

Проблемам алмазного бурового инструмента посвящены труды Башкатова Д. Н., Блинова Г. А., Богданова Р. К., Воздвиженского Б. И., Волкова С.А., Исаева М. И., Киселева А. Т., Козловский Е. А., Кривенко Е.М. Марамзина А. В., Нескормных В. В., Онищина В. П., Осецкого А. И., Остроушко И. А., Пономарева П. В., Соловьева Н. В., Спирина В. И., Ступак А.И., Сулакшина С. С., Третьяка А.Я. Особое внимание при этом уделялось изучению и разработке конструкции инструмента, исследованию кинематики и динамики бурения, а также применяемым конструкционным и инструментальным материалам. Вместе с тем, число работ, посвященных совершенствованию технологии изготовления алмазного инструмента, а также исследованию влияния качества изготовления на ресурс инструмента весьма ограничено, что и привело к необходимости проведения настоящего исследования.

Объектом исследования являются алмазные долота.

Предмет исследования - технологические методы повышения качества и ресурса алмазных долот.

Цель работы – повышение ресурса алмазных долот на основе совершенствования конструкции инструмента и технологии его изготовления, обеспечивающих требуемые параметры точности базовых и исполнительных поверхностей на этапах механической обработки и окончательной сборки.

Идея работы состоит в использовании многокоординатной обработки корпуса долота на станках с ЧПУ и автоматической сборки ниппеля с корпусом для обеспечения требуемой точности изготовления и технологичности конструкции алмазного долота на основе принципов DFMA, что позволяет повысить производительность изготовления инструмента и его эксплуатационные характеристики.

Задачи исследования:

1. Анализ конструкции алмазного долота, специфики эксплуатации и причин отказов бурового инструмента.
2. Обоснование технических требований на изготовление алмазных долот и качества сборки соединений инструмента.
3. Обоснование целесообразности замены сборной конструкции корпуса долота на цельнометаллическую на основе анализа технологичности конструкции изделия, исходя из принципов концепции DFMA, определение комплексных и частных показателей алмазных долот.
4. Разработка технологии механической обработки цельнометаллического корпуса долота с обеспечением требуемых параметров точности базовых и исполнительных поверхностей детали на основе использования методов аналитической теории базирования.
5. Выявление и анализ позиционных связей элементов конструкции алмазных долот со сборным корпусом для моделирования и описания влияния погрешностей установки на формирование заданных требований точности инструмента.
6. Выявление и анализ позиционных связей элементов технологической системы, проявляемые на этапе механической обработки цельного корпуса, для обоснования требований точности бурового инструмента новой конструкции.
7. Определение условий выполнения автоматической сборки соединения корпус-ниппель долота и разработка предложений для

автоматизации процесса изготовления инструмента с требуемыми параметрами точности.

Научная новизна работы заключается в разработке научно обоснованных конструкторско-технологических решений, обеспечивающих технологичность конструкции и достижение требуемых параметров точности алмазного долота на основе выявления и анализа формируемых позиционных связей элементов конструкции на этапах его изготовления и определяющих пути повышения ресурса бурового инструмента.

Основными составляющими научной новизны являются:

1. Раскрытие пространственных размерных связей, позволяющих обосновать методы достижения точности и определить факторы, влияющие на отклонения основных параметров точности буровых долот – позиционную точность и радиальное биение зубков относительно оси долота, точность диаметральных размеров, соосность осей корпуса и ниппеля.

2. Теоретическое обоснование прогрессивной цельнометаллической конструкции корпуса долота и целесообразности автоматической сборки ответственных соединений бурового инструмента на основе выявления и расчета частных и общих показателей технологичности конструкции изделия.

3. Аналитическое обоснование и математическое описание модели формируемой точности базовых и исполнительных поверхностей цельнометаллического корпуса алмазного долота в процессе механической многокоординатной обработки.

4. Выявление и математическое описание условий автоматической собираемости соединения «корпус-ниппель» и достижения высокой точности резьбового соединения на основе использования принципов групповой взаимозаменяемости. с учетом параметров относительного положения и движения сопрягаемых деталей

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Изготовление цельнометаллического корпуса взамен сварного с использованием многокоординатной обработки обеспечивает точность базовых

поверхностей не ниже 10 качества и снижает трудоёмкость изготовления долота на 28...32%.

2. Условия автоматической собираемости резьбового соединения ниппель-корпус алмазного долота выполняются при увеличении ширины направляющих фасок на сопрягаемых поверхностях деталей с 3 до 4 мм, что позволяет расширить линейные параметры точности позиционирования устанавливаемого ниппеля с 1,04 до 1,38 мм, а угловые - с 12 до 17°.

4. Ресурс алмазного долота напрямую зависит от качества его изготовления и определяется точностью сборки резьбового соединения и установки резцов в корпусе долота. Использование принципов групповой взаимозаменяемости позволяет уменьшить допуск на зазор ITS : при двух группах сортировки с 0,7 мм до 0,35 мм, при четырех – до 0,15 мм; допуск на радиальное биение T_R с 0,14 мм до 0,08 мм при двух группах сортировки, что обеспечивает повышение уровня качества K соединений до 0,94..0,98, а эксплуатационный ресурс долота T до 0,95 от максимально возможного, равного 1.

Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается использованием апробированных методов системного анализа, применением сертифицированных программ, хорошей сходимостью полученных результатов расчета с данными литературных источников по теме исследования.

Методы исследования

Теоретические исследования основаны на базовых принципах теории размерного анализа, аналитической теории баз, теории резания, научных основах технологии машиностроения, методах математического и цифрового моделирования позиционной точности элементов алмазного долота при механической обработке и сборке.

Научное значение работы состоит в разработке научного подхода к обоснованию и моделированию позиционной точности функционально связанных элементов алмазного долота, что позволило усовершенствовать конструкцию и технологию изготовления бурового инструмента, тем самым

создать предпосылки организации автоматизированного производства, повысить качество изготовления и ресурс инструмента.

Практическое значение работы:

1. Предложена методика выявления и анализа пространственных размерных связей алмазного долота, при помощи которой представляется возможным моделировать позиционную точность элементов бурового инструмента на этапах его изготовления.

2. Разработана технология механической обработки предложенной конструкции цельного корпуса с описанием возникающих погрешностей обработки, анализ которых позволяет достичь заданную точность исполнительных и базовых поверхностей детали.

3. Разработаны технологические рекомендации по автоматической сборке соединения «корпус-ниппель» и выявлены условия их автоматической собираемости.

4. Разработана методика количественной оценки технологичности конструкции долота, а также расчета частных и комплексных показателей для условий автоматизированного производства.

5. Предложен модернизированный технологический маршрут изготовления долота с использованием в качестве упрочняющей обработки способов, альтернативных наплавке, не оказывающих температурное влияние на материал корпуса и достигаемую на этапах механообработки точность.

Личный вклад автора

Автором выполнены теоретические исследования, математическое моделирование позиционной точности исполнительных и базовых поверхностей инструмента, расчет погрешностей установки на этапах механической обработки и сборки долота, 3D-моделирование технологической системы механообработки, расчет пространственных размерных цепей, анализ технологичности конструкции долота.

Реализация результатов диссертационной работы

Результаты работы приняты к использованию в ООО «НПЦподземмаш», а также используются в учебном процессе НИТУ МИСИС при подготовке студентов-магистров машиностроительного профиля.

Апробация работы. Основные положения и результаты работы докладывались на следующих международных и российских конференциях: Международной научно-практической online-конференции «Интеграция науки, образования и производства – основа реализации Плана нации» (Сагиновские чтения №13), посвященной 30-летию независимости Республики Казахстан в КарГУ, 2021 г.; Международной научно-практической конференции: «Инновационные технологии в машиностроении», Томск, 2022 г., Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых «Инновационные идеи в машиностроении» (ИИМ-2022) в СПбПУ, 2022 г., а также на международном научном симпозиуме «Неделя горняка» 2021-2022 г.

Публикации. Основные положения диссертационной работы опубликованы в 6 научных трудах, из которых 3 - в журналах, входящих в перечень рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК РФ.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографического списка и приложений. Работа изложена на 147 страницах, содержит 22 таблицы и 35 рисунков. Библиография включает 119 наименований.

Глава 1 Анализ состояния проблемы, обоснование цели исследований

1.1 Служебное назначение, классификация и сравнительная характеристика буровых долот

Буровые и буровзрывные работы являются одним из первых и трудоемких технологических этапов, реализуемых при разработке и освоении открытых и подземных месторождений полезных ископаемых. Уровень производительности буровзрывных работ, их энергоемкость и стоимость определяются рядом факторов – горно-геологическими условиями бурения, техническим параметрами применяемого оборудования, выполняемыми технологическими задачами и параметрами процесса бурения, а также ресурсом применяемого бурового инструмента, его эффективностью и стойкостью.

Долото – основной вид породоразрушающего инструмента, применяемого в горном деле при роторном бурении взрывных и геологоразведочных скважин. По конструкции рабочей части и характеру разрушения горной породы долота делятся на шарошечные, лопастные, алмазные и долота типа ИСМ (рис. 1.1). Шарошечные долота разрушают породу дроблением и скалыванием, лопастные – резанием и скалыванием, алмазные, а также долота типа ИСМ – резанием и истиранием [8]. К числу перспективных конструкций долот относятся комбинированные алмазно-шарошечные долота типов PDC/TRICONE, «КумераТМ» для бурения твердых пород [31, 41; 78].

По назначению долота делятся на три класса: для бескернового бурения, колонкового бурения и для специальных целей [13, 35].

Наиболее универсальным инструментом в бурении пород являются шарошечные долота (рис. 1.1, а). Формирование скважины определенного диаметра при этом создается за счет вращения шарошек, дробящих породу [11, 85]. Конструкция инструмента до сих пор модернизируется, но остается сложной, поскольку его базирующей частью являются подшипники.

Вращающиеся шарошки, имеющие форму конусов или цилиндров, закрепляются к секциям, которые между собой свариваются. Форма и расположение шарошек выбирается таким образом, чтобы осуществлять при бурении как ударное, так и ударно-сдвигающее действие.

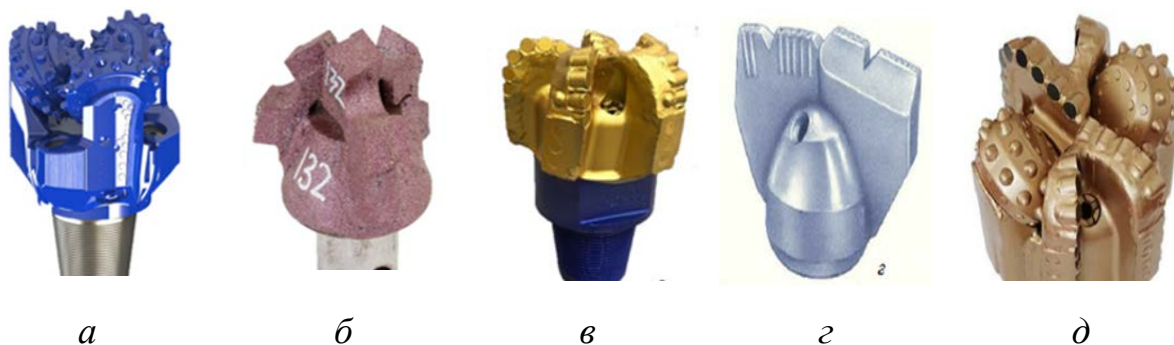


Рисунок 1.1 – Буровые инструменты: *а* – шарошечное долото, *б* – лопастное долото, *в* – алмазное долото, *г* – фрезерное долото; *д* – комбинированное алмазно-шарошечное долото

В процессе работы шарошечного долота проскальзывание шарошек позволяет получить дополнительное скалывание, которое в свою очередь эффективно влияет на породоразрушение.

Количество шарошек определяется областью применения данного инструмента, так, например, одношарошечное долото используется для бурения скважин на большую глубину, двухшарошечное – в геологоразведочных работах, четырехшарошечное применяется для бурения в сложных условиях. Виды шарошечных долот не имеют четкой градации по области применения.

Лопастные долота (рис. 1.1, *б*) имеют простую конструкцию. Долото представляет собой корпус, к которому жестко закреплены лопасти, количество которых может быть различным. Лопастное долото целесообразно использовать в мягких и довольно рыхлых породах. В благоприятных условиях, данный инструмент может работать на высоких скоростях, и тем самым повышать эффективность бурения. К примеру, можно пробурить скважину глубиной 1500 метров за одну проходку [19]. Под действием осевой нагрузки лопасти долота

внедряются в горную породу, а под действием вращающего момента срезают или скалывают ее.

Лопастные долота классифицируют по количеству лопастей на одно-, двух-, трех- и шестилопастные. Однолопастные долота используют для бурения цементных пробок, трехлопастной инструмент обладает истирающе-режущим действием.

Чтобы увеличить срок службы инструмента лопасти долота армируют. Процесс армирования уменьшает разрушающее воздействие пород и позволяет получить наиболее ровные, гладкие стенки скважины [47].

Одной из разновидностей лопастных долот являются алмазные долота (рис. 1.1, в). Начиная бурение, не всегда можно предугадать какие включения и пласты пород появятся в месте образования скважины. Особенность конструкции и материал алмазных долот в этом случае дают ряд преимуществ по сравнению с другим буровым инструментом. Конструкция алмазного инструмента рассчитана на среднюю твердость породы, но также учтена возможность использования инструмента в случае, когда твердые породы чередуются с мягкими. Поэтому алмазные долота применяют для бурения вертикальных и наклонно-направленных скважин при прохождении песчаников, доломитов, известняков и других пород, в которых эффективность применения шарошечных долот резко снижается. Алмазные долота обеспечивают достаточно высокие скорости бурения; сокращение числа спускоподъемных операций; снижение кривизны вертикальных [15, 16-18].

Фрезерное долото (рис. 1.1, г) можно считать самым простым по конструкции, более прочным и устойчивым. Основой инструмента является монолитный корпус, в который запрессованы дробящие части, обеспечивающие ему колоссальную эффективность особенно при проходке твердых пород или пластов с металлическими включениями.

Фрезерное долото часто используют для пробивки бетонной пробки. Вместе с тем они обладают рядом ограничений и недостатков, в частности, не используются при проходке вязких пород, характеризуются небольшой

скоростью проходки, конструкция инструмента предполагает достаточно простой способ промывки. Но даже с учетом всех минусов, данный инструмент незаменим для бурения скважин и часто используется как вспомогательный инструмент [42].

Из приведенного анализа следует, что наиболее универсальным буровым инструментом являются шарошечные долота. Вместе с тем существенным недостатком трехшарошечных секционных долот является отсутствие возможности восстановления работоспособности инструмента и его повторного использования. Это прежде всего обусловлено их конструктивным исполнением, спецификой технологии производства и высокой трудоемкостью изготовления. В связи с этим и по ряду других объективных причин, шарошечные долота в настоящее время весьма активно вытесняются алмазными долотами, которые характеризуются более жесткой конструкцией, широкими технологическими возможностями и большим ресурсом. На рис. 1.2 представлены данные компании КазДуко Сервисез [118] за 2022 г. об эффективности использования шарошечных и алмазных долот при освоении нефтяного месторождения Жаркамыс (Республика Казахстан). Общая экономия при бурении скважины глубиной 800 м составила около 6 000 000 руб. При этом время бурения сокращается практически в три раза, а время на спуско-подъемные операции уменьшается почти в 1,6 раза, а затраты при бурении 1 метра скважины алмазными долотами сокращаются в 1,7...1,9 раз в зависимости от диаметра инструмента.

Алмазные долота продемонстрировали свою эффективность и при бурении горизонтальных газоотводных скважин при строительстве угольных шахт, что указывает на возможность их использования на установках СБШ.

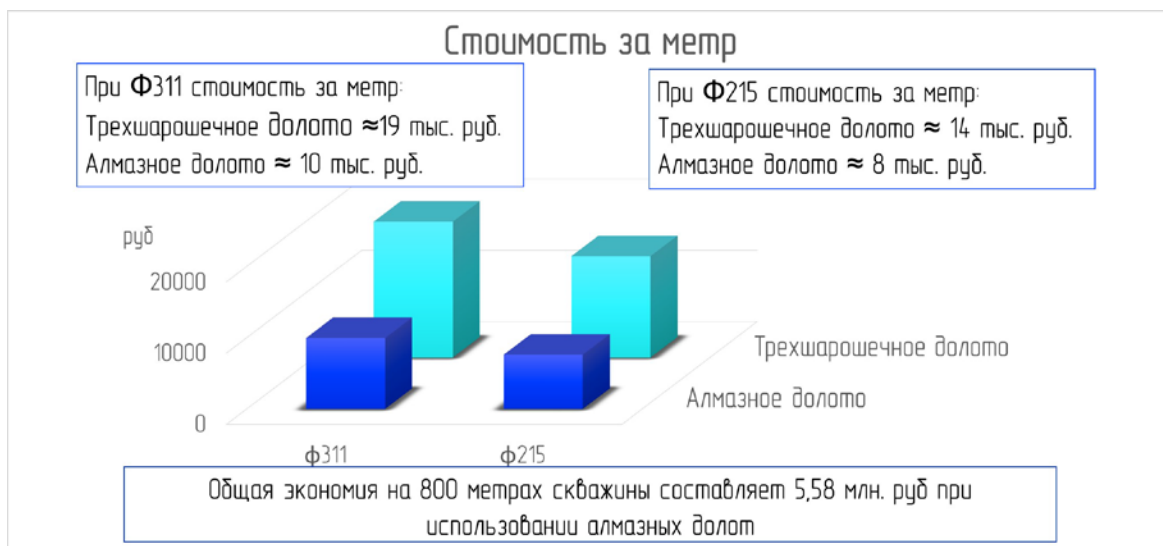


Рисунок 1.2 – Сравнительная оценка эффективности применения трехшарошечного и алмазного долот [118]

Развитие исследований в направлении модернизации породоразрушающего инструмента привели к созданию комбинированного бурового инструмента (рис. 1.1, д), сочетающего в себе достоинства шарошечных и алмазных долот, расширяя, тем самым, его технологические возможности и области применения в породах различной крепости и абразивности. Вместе с тем, высокая стоимость и значительная трудоемкость изготовления данного инструмента пока сдерживает его широкое применение в горнопромышленной отрасли, закрепляя приоритет за алмазными долотами.

Алмазные долота имеют небольшую площадь контакта с забоем, поэтому эффективное разрушение горной породы таким инструментом производится при сравнительно небольших осевых нагрузках (в 3... 5 раз меньше, чем на шарошечный породоразрушающий буровой инструмент). Алмазное долото применяют для бурения в породах VII - XII категорий по шкале проф. М. М. Протодяконова. Срок службы алмазных долот в 3-5 раз больше шарошечных и лопастных при идентичных нагрузках на инструмент [30, 105].

Несмотря на очевидные достоинства и совершенство конструкции алмазных долот, работы, направленные на увеличение ресурса инструмента, его эффективности и стойкости не теряют свою актуальность. Цель проводимых

исследований - максимально эффективно использовать дорогостоящий алмазный инструмент, путем совершенствования применяемых инструментальных материалов, конструкции и технологии его изготовления.

1.2 Анализ конструкции и технологий изготовления алмазных долот

Конструкция алмазного долота (рис. 1.3) представляет собой сложную техническую систему - сборочную единицу, состоящую из следующих основных элементов: резцов, корпуса с приваренными лопастями, ниппеля. В корпусе имеются промывочные каналы, которые могут оснащаться сменными керамическими насадками. Резцы алмазного инструмента представляют собой твердосплавные зубки – своего рода матрицу цилиндрической формы - с алмазоносным слоем в виде пластины из алмаза синтетического поликристаллического (АСПК). В англоязычной литературе алмазные долота получили название PDC-долота или долота с PDC- резцами (PolyCrystalline Diamond Compact). В России алмазные долота маркируются аббревиатурой ДАП (или АТП – алмазно-твердосплавные пластины), что означает долото со вставками из твердого сплава, оснащенными пластинами поликристаллических алмазов.

Таким образом PDC резец – это бикомпонентный резец. Его получают, при помощи спекания слоя поликристаллических алмазов на подложке-матрице из карбида вольфрама при высокой температуре и под значительным давлением. Величина используемых в них алмазов и качество изготовления напрямую влияют на результативность породоразрушения [48].

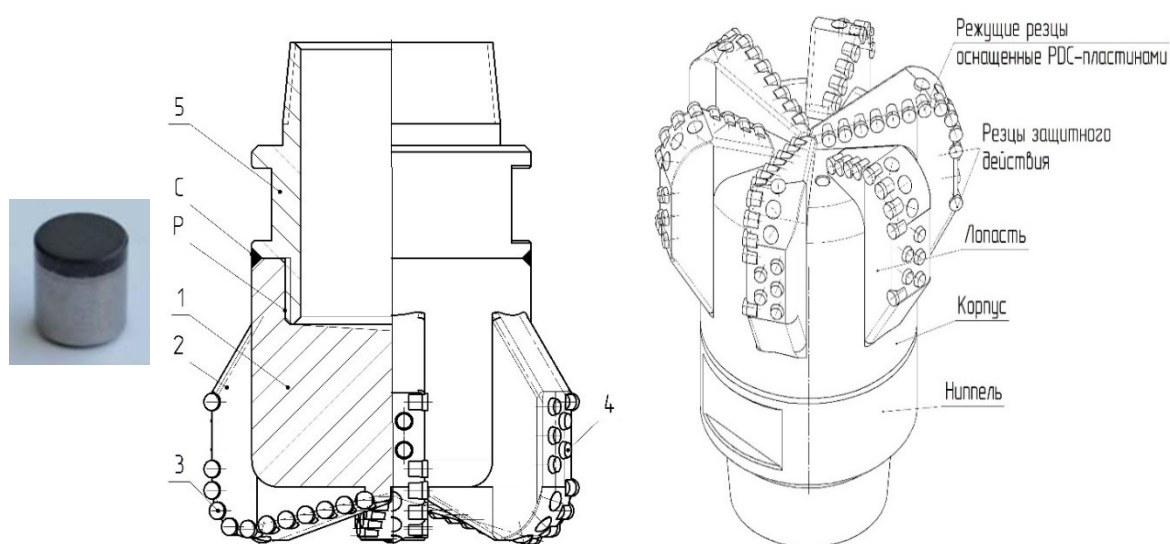


Рисунок 1.3 – Алмазное долото: 1 – корпус долота; 2 – лопасти; 3 – режущие зубки с алмазонасным слоем; 4 – резцы защитного действия; 5 – ниппель; P – резьбовое соединение; C – сварочный шов

В зависимости от назначения и эксплуатационных характеристик, режущие элементы могут располагаться на корпусе долота в один, два или три слоя, при этом позиционирование резцов относительно оси инструмента может быть выполнено в трех исполнениях: радиально, спирально, ступенчато.

На рис. 1.4 представлены различные конструкции алмазных долот, применяемых в горном деле и при освоении нефтегазовых месторождений. Антязарезное долото (рис. 1.4, б) предназначено для проработки мест сужения и калибрования ствола скважины в малоабразивных мягких породах с пропластками пород средней твердости; бицентричное долото (рис. 1.4, в) используется для бурения с одновременным расширением ствола наклонно-направленных и горизонтальных скважин (шпуров) в мягких породах с промывкой забоя технической водой или буровым раствором, а зарезное двухрядное алмазное долото (рис. 1.4, г) служит для обеспечения срезки на необсаженном участке скважины и бурения интервала набора угла с промывкой забоя [28, 38, 81].

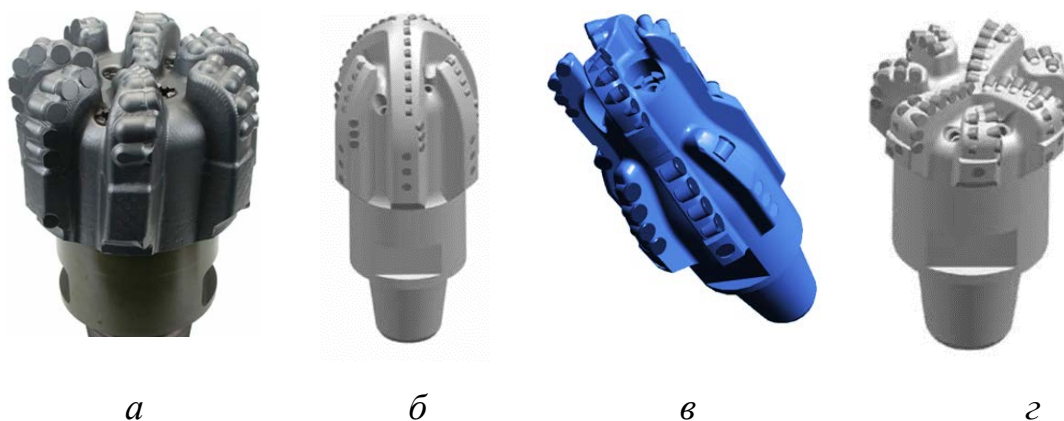


Рисунок 1.4 – Конструктивное исполнение алмазных долот с PDC резцами:

а - алмазное долото; *б* - антизарежное долото; *в* - бицентричное долото; *г* -
зарежное алмазное долото двухрядное

Основой конструкции инструмента является его профиль (рис. 1.5, а), который непосредственно влияет на управление долотом и стабильность выработки пород, плотность посадки резцов, надёжность и долговечность долота, на механическую скорость проходки, а также очистку и охлаждение долота.

Профиль алмазного долота проявляется в поперечном сечении по вертикальной осевой линии и включает следующие части или конструктивные элементы (рис. 1.5, а): центр, конус, нос, плечо (наружный конус), наружный и калибрующий диаметры.

Геометрический центр долота приходится на вершину конуса, который может быть представлен в двух видах: глубокий (угол меньше 90^0) и плоский конус (угол больше 90^0) (рис. 1,5, б). Угол конуса (так называемый заборный конус) влияет на стабильность долота, эффективность удаления шлама, плотность размещения зубков, управляемость инструментом и его работоспособность.

Долота с глубоким конусообразным профилем очень стабильны, но ими трудно управлять. Высокая плотность расположения резцов в центральной части долота повышает скорость резания породы при проходке. Однако в процессе бурения образующийся шлам проходит достаточно долгий путь при выходе из

глубокого заборного конуса и поэтому эффективность очистки у таких инструментов, как правило, относительно низкая. Данный вид профиля является менее агрессивным, поскольку рабочая часть инструмента по сравнению с плоским конусом имеет меньший размер.

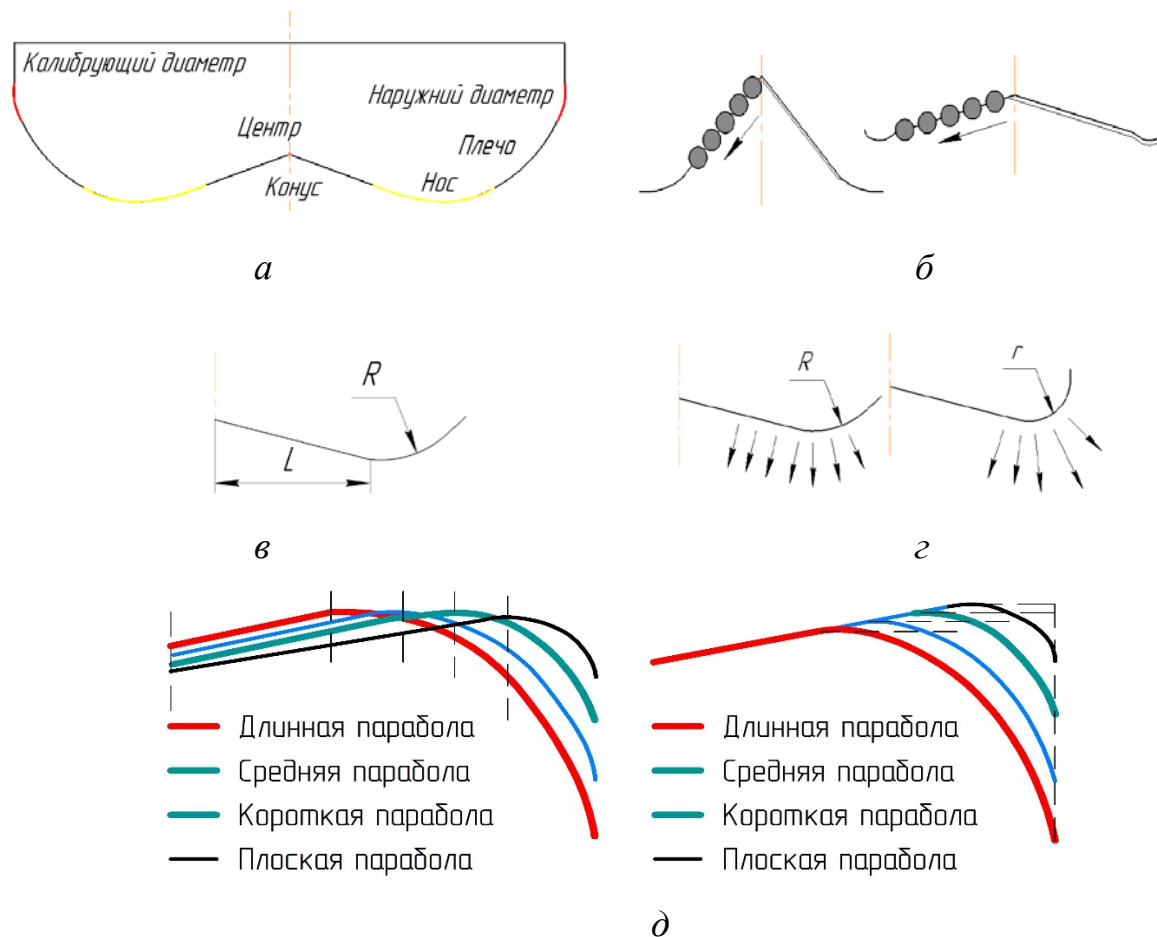


Рисунок 1.5 – Конструктивные особенности АД: *а* - профиль алмазного долота; *б* - возможные углы вершины конуса с PDC-резцами; *в* – «нос» долота; *б*, *г* –распределение нагрузок; *д* - профили алмазного долота в виде парабол

Долота с неглубокими конусообразными профилями менее устойчивы, но хорошо управляются и очищаются. Применение плоских долот в большей степени распространено в наклонно-направленном бурении. Профили с таким конусом обычно требуют длинных калибровочных секций для обеспечения курсовой устойчивости долота. Они имеют относительно меньший объем резца в центре долота, поскольку профиль имеет меньшую площадь поверхности. Данный тип инструмента не следует использовать с управляемыми буровыми

двигателями, поскольку их относительно короткий калибр обеспечивает недостаточную плотность резца для поддержания эксцентричного вращения во вращательном режиме и приводит к чрезмерному износу резца [87].

«Нос» долота определяется расстоянием по горизонтали от центральной линии долота до линии, на которую приходится радиус выступа (рис. 1,5, в). Радиус выступа оказывает значительное влияние на потенциальную плотность резания долота. Большее соотношение осевой линии к радиусу обеспечивает большую площадь поверхности для зубков, гидравлических элементов и сопел, что положительно влияет на долговечность алмазного долота [100].

Большие радиусы обеспечивают большую площадь поверхности для лучшего распределения нагрузки при бурении крепких и перемежающихся пород. Небольшие или острые радиусы обеспечивают более высокую точечную нагрузку на резцы и наиболее подходят для мягких, однородных пластов (рис. 1,5, з).

Плечо долота – это зона от точки касательной к наружному закруглению носа до начала резцов по наружному диаметру долота.

Наружный диаметр - плавный переход между плечевой поверхностью и калибрующим диаметром.

Калибрующий диаметр - обрабатывает стенки скважины и стабилизируют долото.

Существует четыре основных типа профиля долота (рис. 1,5, д): плавный (плоский), короткий параболический (парабола), средний параболический, длинный параболический. Плоские профили подходят для твердых, крепких, менее абразивных пород. Длинные параболические профили используются для мягких, более абразивных форм. Короткие и средние параболические профили подходят для довольно абразивных материалов средней твердости.

Расположение и угол наклона резцов в конструкции инструмента нормирован и выполняется, исходя из их служебного назначения (табл.1.1 и 1.2).

Таблица 1.1 – Параметры обратных углов для различных условий работы

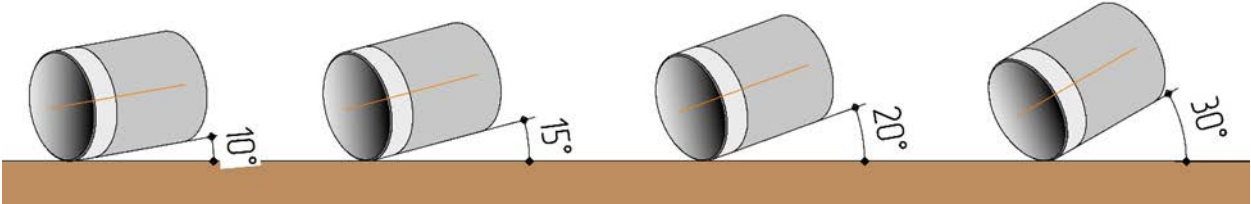
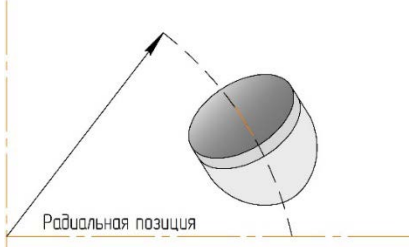
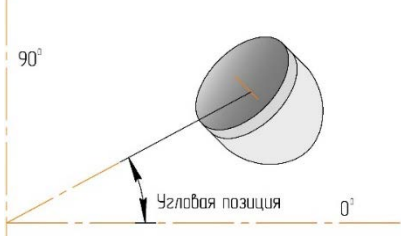
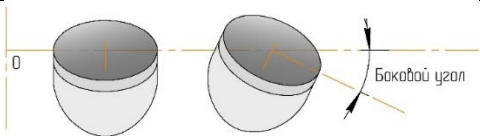
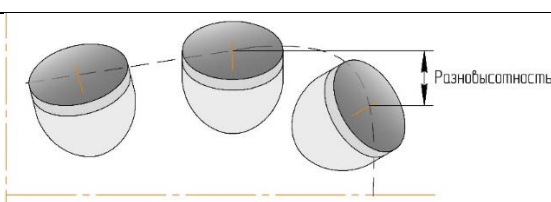
Обратные углы			
			
Для мягких пород – глины, сланца Высокие скорости бурения	Мягкие породы – сланцы	Абразивные породы, дольше ресурс резца	Крепкие породы Типично для калибрующих

Таблица 1.2 - Посадка и ориентация резцов в долотах

Радиальная позиция	Расстояние от центра долота до центра алмазной пластины резца	
Угловая позиция	Угол между опорной линией и линией, соединяющей центры резца и долота	
Боковой угол	Равен «0» когда проекция плоскости алмазной пластины совпадает с линией радиуса долота.	
Высота посадки - выступание Вертикальное расстояние от поверхности долота по максимально точке выступа торцевого резца до центра алмазной пластины		

Алмазные резцы долота классифицируют по геометрической форме и назначению. Наибольшее распространение получили PDC-резцы круглой и

треугольной форм (рис. 1.6, *а*, *б*), также применение нашли и резцы с термостойкими (НОТ) и горячепрессованными (ГНП) вставками [48].

PDC- резцы для буровых долот производят преимущественно за рубежом – в США, Японии, либо в Китае. [20, 112]

Основу резца круглой формы составляет твердый сплав, покрываемый слоем поликристаллического алмаза толщиной от 0,5 до 0,7 мм (рис. 1.6, *а*). Прочность на изгиб у твердого сплава значительно больше прочности поликристаллического алмаза [116], это позволяет эффективно достигать необходимых характеристик для выработки пород. PDC - резцы выпускают различных диаметров и высотных параметров для вооружения новых и ремонта изношенных долот. Диаметр резца варьируется от 12,7 до 50,8 мм.

Резцы треугольной формы крепятся к державке при помощи диффузионной сварки треугольной формы, в результате чего образуется элемент вооружения в виде зубка (рис. 1.6, *б*). При этом резцы треугольной формы используют при установке единичного резца в пограничной зоне лопасти долота, либо в виде комплекса из нескольких резцов, образующих мозаичный массив режущих элементов (рис. 1.6, *в*) [62]

Существенным недостатком PDC-резцов является невысокая теплостойкость - при температуре свыше 700°C PDC-резцы начинают разрушаться.

Конкурентами PDC-резцов являются НОТ-резцы, но из-за сложной технологии их изготовления и дороговизны, они пока не получили широкого применения. Термостойкие вставки НОТ подвергаются многократной термической обработке, что позволяет им эффективно работать при высоких температурах.

Износостойкость НОТ резцов превышает характеристики обычных резцов примерно в 5 раз [8] и тем самым повышает надежность и долговечность элемента. Высокая режущая способность резца, повышенная износостойкость способствуют бурению на длинные расстояния без замены инструмента и увеличению механической скорости. Высокая сопротивляемость скалыванию

режущей кромки таких была достигнута за счет оптимизации распределения остаточных напряжений.

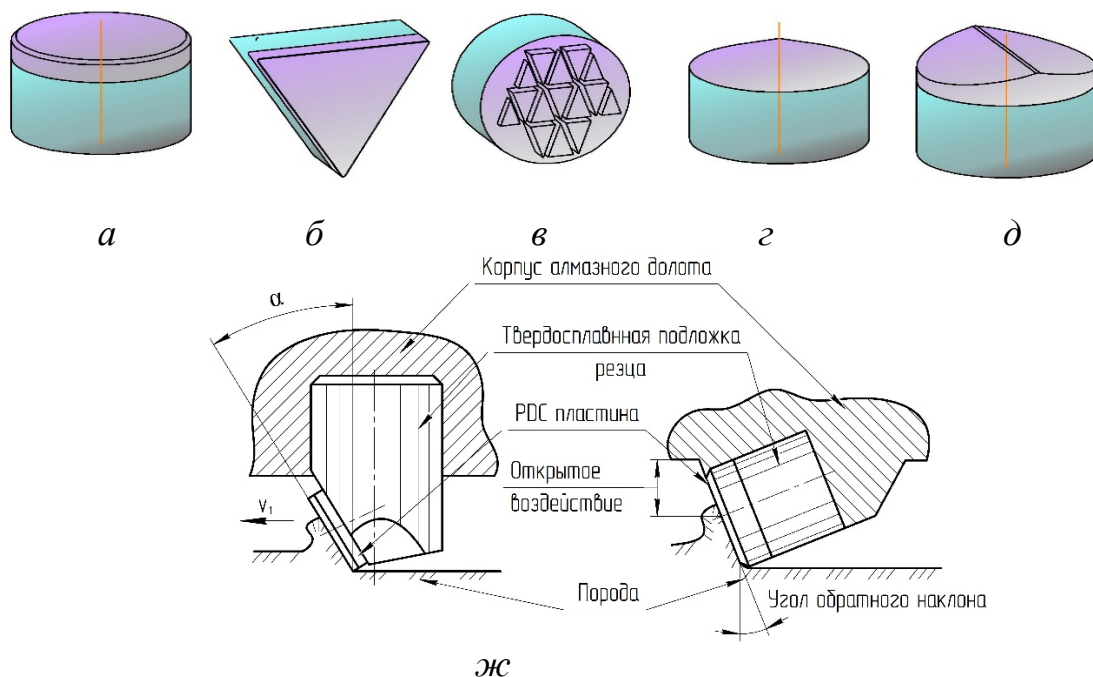


Рисунок 1.6 - Резцы алмазных долот: *а* – алмазно-твердосплавная пластинка круглой формы, *б* – резцы треугольной формы, *в* – матричный комплекс резцов, *г*, *д* - резцы гребнеобразной и конической формы; *е* - схемы крепления резцов и взаимодействия с горной породой

Горячепрессованные вставки GHI представляют собой специальную комбинацию кристаллов алмаза и матричного порошка твердого сплава, которая подбирается в зависимости от свойств пород, встречающихся в конкретной задаче бурения [110].

Специальные технологии подготовки спекаемых компонентов способствует равномерному распределению поликристаллических алмазов в твердосплавной матрице, что увеличивает долговечность вставок GHI и ресурс инструмента.

GHI – вставки представляют собой миниатюрные шлифкруги, благодаря чему значительно снижается глубина подрезания породы при каждом обороте инструмента. Существенным достоинством вставок является самозатачивание резцов в процессе бурения. Наряду с этим, вставки, выступая над поверхностью корпуса, обеспечивают защиту торцевой части инструмента, улучшая условия

теплообмена режущих кромок при скоростном бурении в разных геологических условиях.

Существуют резцы с более сложной формой в виде гребня или клина (Ахе) (рис. 1.6, з), которые успешно комбинируют режущее действие резца PDC и дробящее действие твердосплавного зубка. Такие резцы значительно повышают эффективность бурения и теплоотдачу, сопротивляемость нагрузкам. прежде всего, за счет увеличения толщины алмазного слоя, комбинации разноразмерных гранул поликристаллических алмазов и оптимизации применяемых материалов [8].

Применяются также вставки конической формы (рис. 1.6, д). Отличительной особенностью таких вставок является их расположение и численность [64, 85]. Количество конических вставок на инструмент не превышает двух единиц. Как правило используют одну коническую вставку, располагая ее в центре долота для создания значительной узконаправленной нагрузки, благодаря чему достигается более эффективное разрушение породы и увеличение ресурса долота в различных условиях бурения. Конические вставки обладают высокой ударной прочностью и повышенной сопротивляемостью абразивному износу. Поэтому срок службы конических вставок значительно превосходит срок службы долот PDC.

Современные достижения в области совершенствования конструкций долот, а также составов применяемых материалов для алмазных резцов продолжают достаточно подробно описаны в монографии авторов В. В. Нескоромных, М. С. Попова, Л. Баочанг [59]

Существующие технологии изготовления долот можно разделить на две группы. В первую можно отнести традиционную базовую технологию, включающую ряд операций механообработки корпуса, лопастей и ниппеля, пайки резцов к лопастям, приваривания лопастей к корпусу, окончательную сборку корпуса и ниппеля [92].

Данная технология характеризуется высокой трудоемкостью, включает значительное число операций механообработки, выполняемых на

универсальном оборудовании и сборочных операций, выполняемых вручную. Уровень автоматизации здесь крайне низкий и обусловлен преимущественно применением трехкоординатной обработки на станках с ЧПУ токарной и фрезерных групп. Наличие высокотемпературного воздействия при термической сварке лопастей к корпусу, приводит к необходимости выполнения дополнительной стабилизирующей термообработки, что также увеличивает трудоёмкость процесса изготовления [71, 73, 93]. Необходимость изготовления специальной оснастки при выполнении сборочных операций для точного позиционирования резцов при их пайке и сварке лопастей в условиях многономенклатурного производства увеличивает капитальные затраты на производство долот. Влияние человеческого фактора осложняет получение стабильных параметров качества на всех этапах производства инструмента.

После сборки долот поверхность корпуса и лопастей дополнительно упрочняют наплавкой твердых материалов или газотермическим напылением покрытий на основе твердых сплавов.

Технологическая схема изготовления корпуса по базовому, традиционному варианту подставлена на рис. 1.7.

Во вторую группу входят технологии, основанные на использовании порошковой металлургии, в процессе которой из подготовленных порошковых материалов спекают цельнометаллический корпус вместе с установленными в его гнездах твёрдосплавными и алмазными резцами [26].

Технология позволяет получить высокое качество изделий, благодаря одновременным спеканием всех конструктивных элементов корпуса долота и вооружения, возможно изготовление корпуса из высокопрочных композиционных материалов, не требующих дополнительного поверхностного упрочнения. При этом ниппель изготавливают по традиционной технологии.

Вместе с тем, учитывая многономенклатурный характер производства и существующие модели долот, для каждого типоразмера инструмента требуется изготовление специальной пресс-формы для формования и спекания корпуса

долота с различным числом лопастей и резцов, что определяет данную технологию как дорогостоящую.

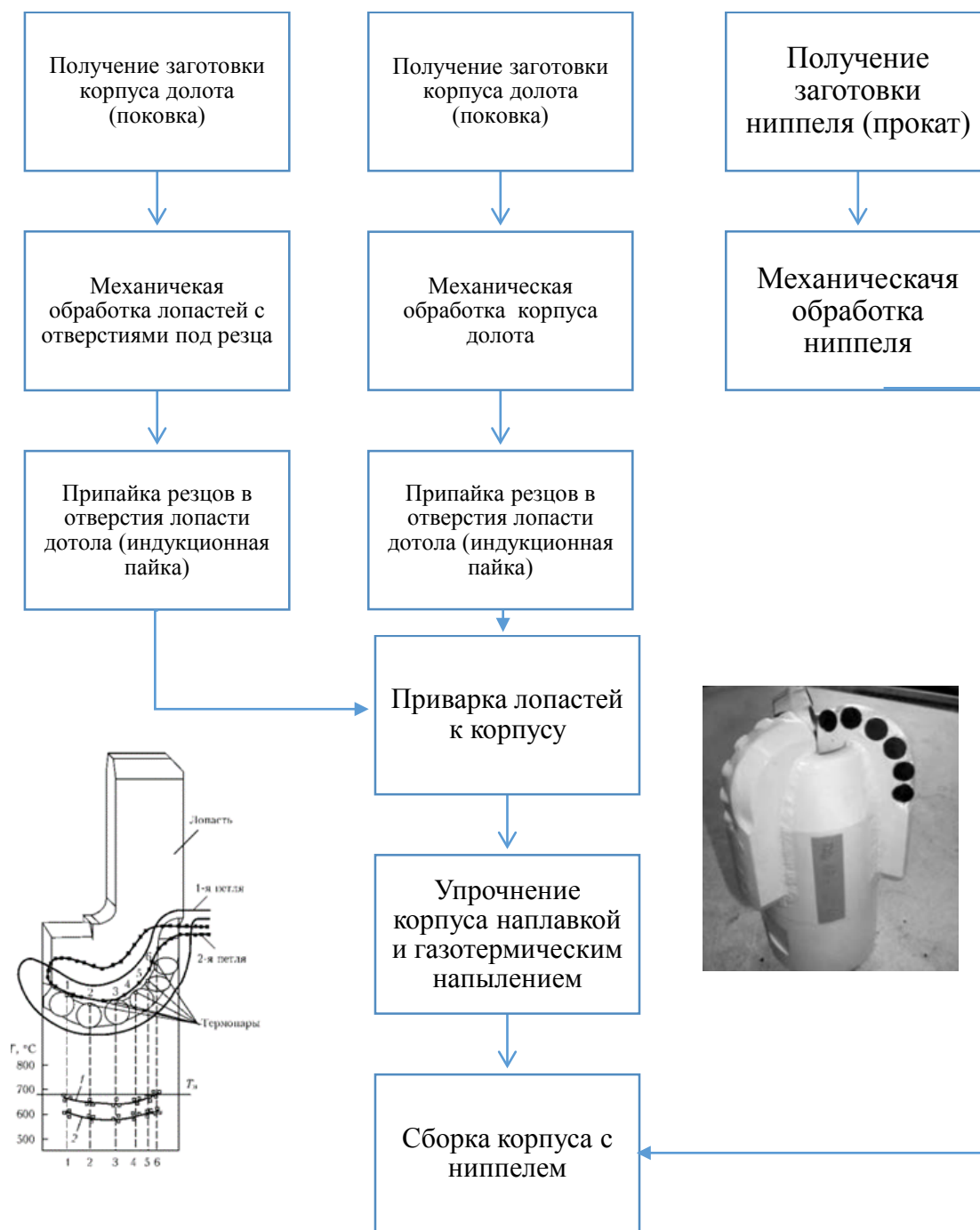


Рисунок 1.7 – Базовая технологическая схема изготовления алмазного долота

Технологическая схема изготовления алмазного долота с применением порошковой металлургии представлена на рис. 1.8.

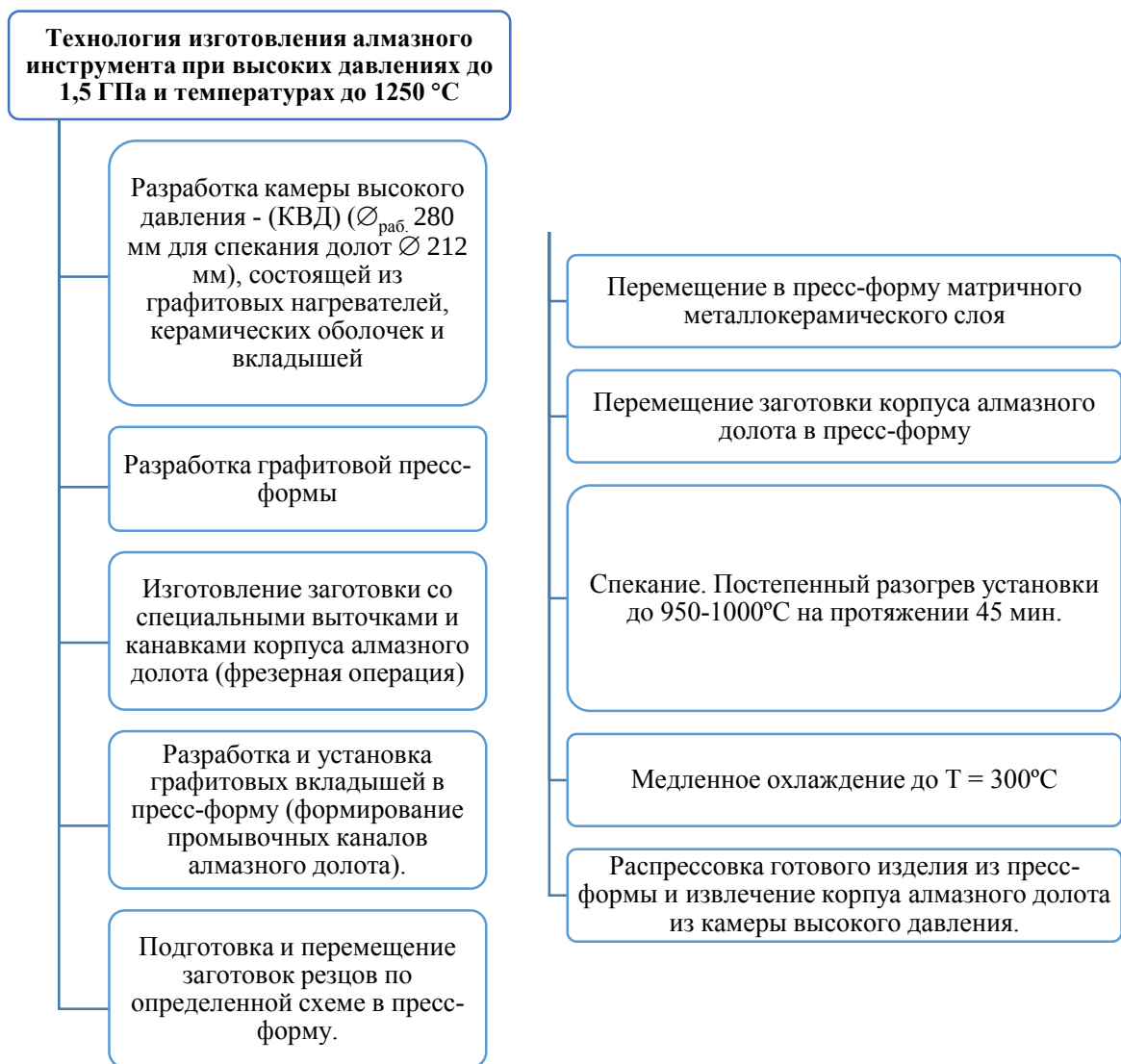


Рисунок 1.8 – Технологическая схема изготовления спеченного корпуса алмазного долота порошковой металлургией

Рассмотренные технологии не являются универсальными, и в первом, и во втором случаях велика доля ручных работ, что определяет высокую трудоемкость данных технологий и необходимость автоматизации технологических процессов с целью стабильного воспроизводства параметров качества от изделия к изделию.

1.3 Анализ причин износа алмазного долота

Алмазные долота относятся к числу дорогостоящих инструментов в силу высокой стоимости материала примененного вооружения и трудоемкости их изготовления. В связи с этим одной из актуальных задач, решаемой при конструировании и изготовлении алмазного инструмента, является повышение ресурса долота. С этой целью состояние инструмента в процессе его эксплуатации постоянно отслеживается с оценкой степени износа резцов, выявлением и анализом факторов, влияющих на работоспособность долот.

Для определения вида износа алмазных долот принято разделять и анализировать две области на инструменте: область внутренних $Z_{\text{внутр}}$ и внешних $Z_{\text{внеш}}$ зубков (рис. 1.9, а, б), которые определяются визуально, либо с помощью следующих формул:

$$Z_{\text{внутр}} = R \cdot 0,67 \quad Z_{\text{внеш}} = R \cdot 0,33, \quad (1.1)$$

где R – радиус АД.

Внутренние и внешние зубки формируют режущую рабочую часть профиля инструмента и воспринимают основную нагрузку при бурении скважин. Эту зону принято обозначать областью А. [12, 105]. Резцы на калибрующей части менее нагружены, однако точность их расположения в радиальном направлении существенно влияет на кривизну скважин. От интенсивного износа эти резцы защищают антивибрационные зубки, также расположенные на цилиндрической части долота.

Износ зубков оценивается по шкале от 0 (нет износа) до 8 баллов (катастрофический износ) независимо от размера режущей части (рис. 1.9, в). Нормальный износ обычно оценивается баллами 3 и 4, значения 5 - 8 присваиваются обычно при сломанных или сильно сколотых резцах [21, 114]. При этом износ, соответствующий 4 баллам, сопровождается также износом лопасти.

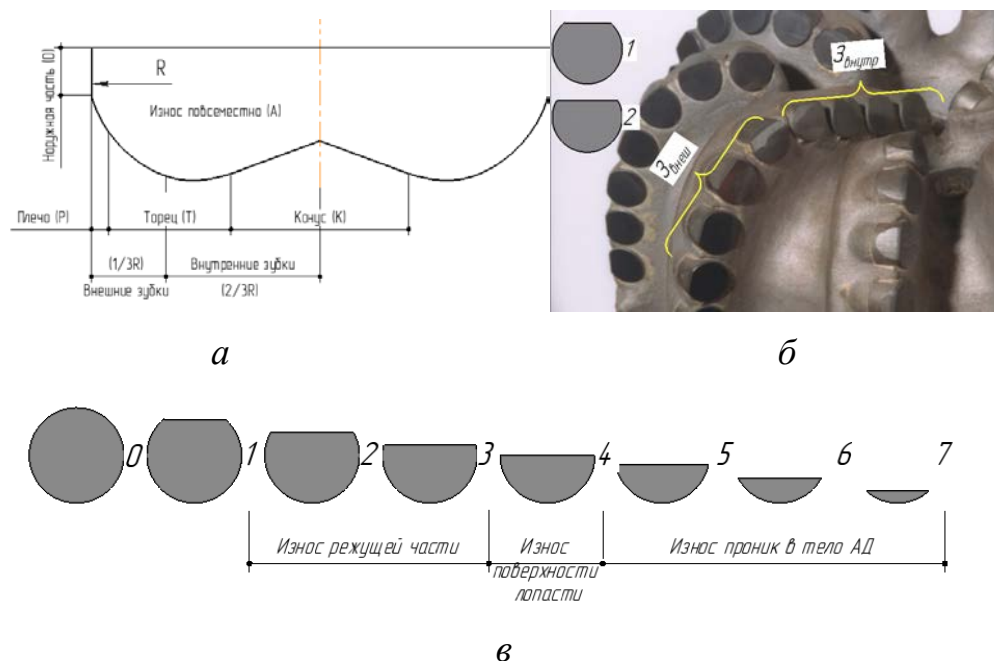


Рисунок 1.9 – Оценка износа инструмента: *а* –расположение областей износа на профиле долота; *б* - изношенное алмазное долото; *в* - шкала износа резцов

Классификация износа по системе IADC (International Association of Drilling Contractors) алмазного долота представлена в табл.1.3 и на рис. 1.10.

Таблица 1.3 - Классификация износа алмазных долот по системе IADC алмазных долот [107]

BF	Отслаивание таблетки PDC	NR	Непригодно для повторного использования
BT	Сломанные зубки/резцы	OC	Эксцентричный износ
BU	Сальник на долоте	PN	Закупорка насадки
CR	Кернение долота	RG	Износ по наружному диаметру
CT	Скол зубков/резцов	RO	Кольцевой износ
ER	Эрозия	RR	Пригодно для повторного использования
HC	Температурное растрескивание	SS	Самозатачивание резцов
JD	Металл на забое	WO	Размыв тела долота
LN	Потеря насадки	WT	Износ, истирание зубков
LT	Потеря зубков/резцов	NO	Отсутствие износа
BB(BC)	Слом лопастей	BM	Разрушение матрицы

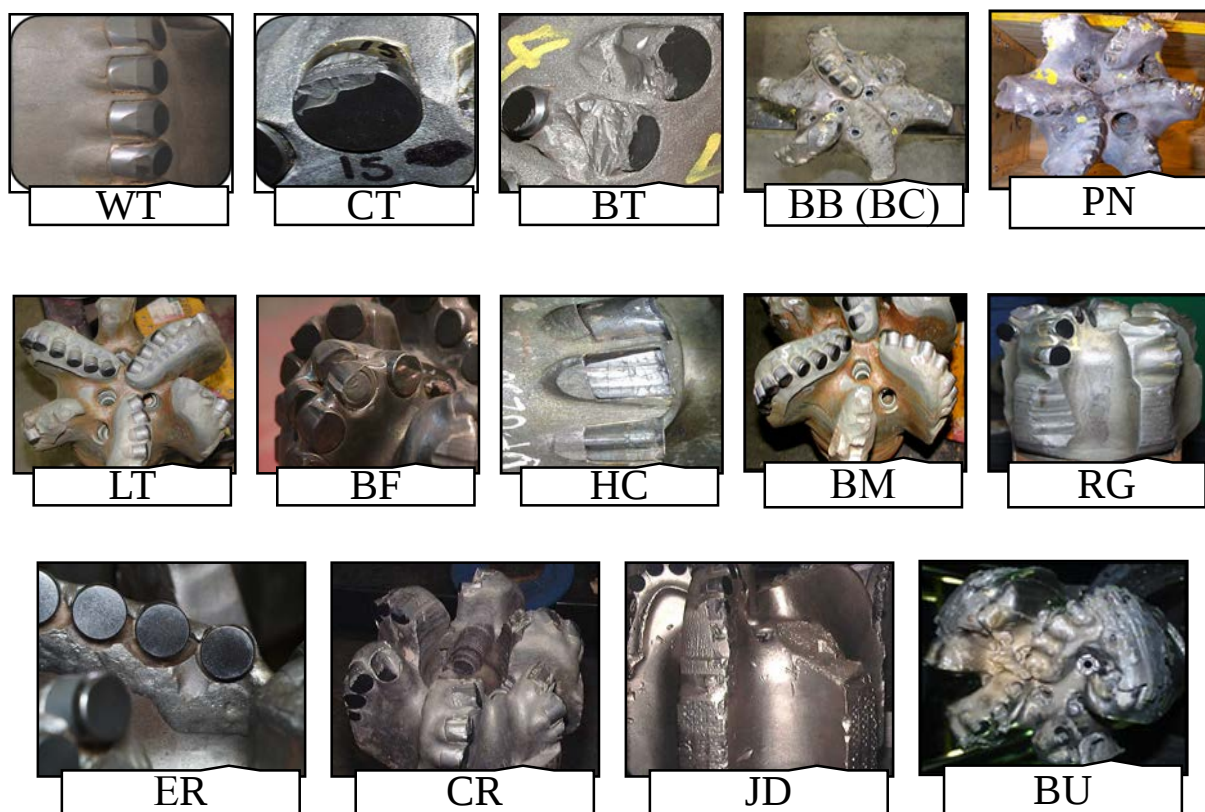


Рисунок 1.10 - Виды износа АД по системе IADC

Рассмотрим основные причины повреждения алмазных долот.

Износ, истирание зубков (WT) - характеризует нормальный и абразивный износ, присущ как для внутренних, так и для наружных венцов. Данный вид износа обусловлен характером воздействия на инструмент горных пород.

Скол зубков/резцов (CT) – проявляется в виде незначительного разрушения алмазной пластины и подложки из карбида вольфрама, может также включать трещины и зоны отслаивания. Причиной возникновения такого дефекта является ударное воздействие при бурении крепких пород, а также неравномерное нагружение отдельных резцов вследствие неточности изготовления и позиционирования.

Сломанные зубки/резцы (BT) – проявляется как разрушение твердосплавной подложки резца. Данный износ принимается для резцов, которые повреждены более чем на 20-30%. Причина возникновения - ударное разрушение.

Эрозия ER – проявляется как на теле долота, так и на твёрдосплавной подложке, чаще всего вокруг резца. Распространение эрозии по алмазному долоту зависит от материала корпуса, ориентации насадок и режущих элементов; применяемого СОЖ, глубины бурения и количество применения.

Металл на забое (JD) – характеризуется результатом воздействия посторонними предметами на забое. Контакт с металлическими предметами может вызвать как незначительное, так катастрофическое разрушения.

Сальник на долоте (BU) – представляет собой образование / сальник, который формируется вследствие недостаточной очистки рабочей части, остановки насосов или бурении вязких пород (технологические причины)

Слом лопастей BV (BC) – характеризует разрушение лапы по всей её ширине. Причинами данного износа могут быть высокий уровень вибрации и возможно неравномерная нагрузка на лопасти, вызванные погрешностями изготовления или конструкции инструмента [94, 95].

К вторичным характеристикам износа относят: температурное растрескивание; эрозия; закупорка насадки и др.

Причины подъёма инструмента представлены в таблице 1.4.

Таблица 1.4 – Причины подъема алмазного долота [108]

BHA	смена компоновки низа бурильной колонны	FM	смена породы
DMF	проблемы с забойным двигателем	HP	геологические проблемы
DSF	слом инструмента	HR	время
DST	опрессовка инструмента	PP	давление
DTF	проблемы с забойным оборудованием	PR	скорость проходки
LOG	каротаж	TD	проектная глубина
RIG	ремонт буровой	TQ	момент
CM	параметры раствора	TW	отворот инструмента
CP	отбор керна	WC	погодные условия
DP	разбуривание цем. стакана	WO	размыв бур. труб

Зная критерии оценки величины износа и количество внутренних и внешних зубков, с помощью среднего арифметического показателя, представляется возможным определить значения износа режущих зубков (в расчет не включаются защитные - антивибрационные резцы, находящиеся на калибрующем диаметре). К примеру, для алмазного долота, представленного на

рисунке 1.9, б, по состоянию внутренних и внешних зубков в соответствии со шкалой износа (рис. 1.9, в) очевидно, что на двух из четырех внутренних резцов $Z_{\text{внутр}}$ износ практически отсутствует, что соответствует 0 баллам, на одном резце износ оценивается 2-мя баллами, на оставшемся четвертом – 3-мя. Износ трех внешних резцов можно оценить 1 баллом. Тогда получаем:

$$ИЗ_{\text{внутр}} = \frac{0+0+1+2}{4} = 0,75 \quad ИЗ_{\text{внеш}} = \frac{1+1+1}{3} = 1$$

Из рисунка 1.9, б видно, что степень износа для внутренних резцов на различных лопастях отличается, т.е. имеет место неравномерный износ алмазных пластин, во многом обусловленный недостатками технологии их изготовления, в частности, нарушением позиционной точности расположения резцов одноименных участков и групп.

Ряд исследований, представленных в научной литературе, направлен на частичную замену фиксированных PDC-резцов на резцы нежесткой конструкции, т.е. самоустанавливающиеся по забою [119].

При работе фиксированного PDC-резца интенсивному износу подвергается преимущественно режущая кромка, обращенная к забою (рис. 1.11). Свыше 60 % долот типа PDC выходят из строя из-за износа и сколов нижней, самой нагруженной кромки резцов [7, 68, 119].

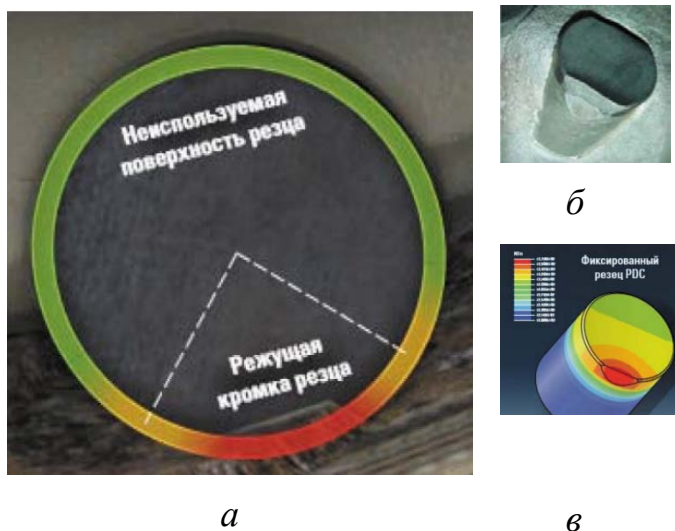


Рисунок 1.11 - Локализация износа фиксированного PDC-резца: а – периметр износа режущей кромки; б – износ твердосплавной матрицы и PDC-пластины; в – цифровая модель активного износа резца [59]

С целью повышения ресурса бурового инструмента разработаны долота с резцами ONYX 360 и ONYX II с возможностью вращения в процессе бурения на 360° (рис. 1.12), что обеспечивает равномерный износ кромки резца. Такими элементами вооружают высоконагруженные части торца долота [7, 22 - 24, 68, 119]. Недостатком вращающихся пластин является повышенная трудоёмкость изготовления и стоимость резцов.

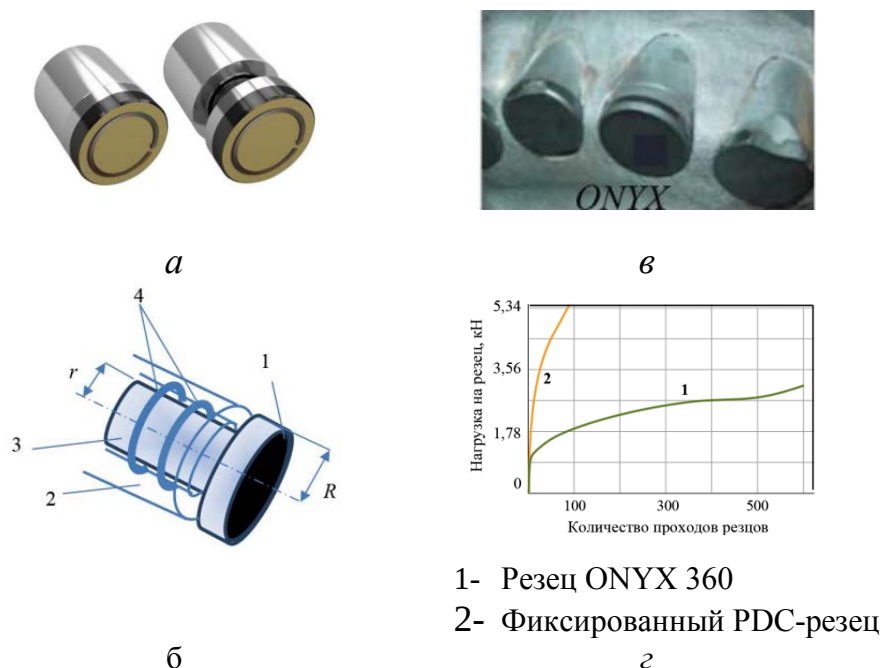


Рисунок 1.12 – Алмазные резцы ONYX 360, обеспечивающие равномерный износ режущей части долот и высокий ресурс инструмента: *а* – общий вид вращающегося резца; *б* - конструкция вращающегося PDC-резца: 1 – PDC-резец; 2 – корпус; 3 – ось; 4 – стопорные упругие кольца ONYX 360; *в*, *г* – сравнительный износ и ресурс фиксированного и вращающегося PDC-резцов.

Из анализа научных работ следует, что наибольшему износу подвержены резцы, расположенные на плече инструмента, т.е. на расстоянии более $2/3$ радиуса долота. Этому способствует большая по сравнению с центральной частью линейная скорость на периферии инструмента в результате, чего существенно увеличивается сопротивляемость горной породы резанию - скалыванию. Наряду с этим, периферийные резцы воспринимают значительные поперечные колебания, возникающие из-за неоднородности свойств горных

пород. Немаловажную роль здесь играет и радиальное биение резцов, обусловленное разновысотностью их посадки относительно корпуса долота.

1.4 Обоснование цели и задач исследования

Из анализа научно-технической литературы следует, что вопросу повышения ресурса алмазных долот посвящено достаточное число работ. Актуальную для современного горного дела научно-практическую задачу исследователи решают разными способами и, главным образом, подбором специальных составов и технологии создания алмазных пластин, определением рациональной последовательности расстановки и позиционирования режущих зубков относительно забоя, разработкой различных конструкций алмазных резцов и комбинированных долот с одновременным использованием как твердосплавного, так и алмазного вооружения, исследованием кинематики режуще-скалывающего бурения, упрочнением корпуса долота и др. Вместе с тем, вопросам технологического обеспечения качества изготовления инструмента и его влияния на ресурс долота, а также обоснования параметров точности базовых и исполнительных поверхностей и обеспечения их в процессе изготовления бурового инструмента посвящено весьма ограниченное число работ [24]. При этом известно, что качество изготовления, оказывает существенное влияние на эксплуатационные характеристики и должный ресурс инструмента.

Анализ видов повреждения буровых долот с PDC-резцами выявил неравномерный характер износа как торцевых, так и калибрующих резцов при идентичных условиях и технологических режимах эксплуатации, что во многом определяется нарушением позиционной точности. Соответственно, достижение в процессе обработки стабильных параметров точности как базовых, так и исполнительных поверхностей для всех конструктивных элементов составного инструмента, позволит обеспечить равную позиционную точность резцов, а также равномерное их нагружение в процессе эксплуатации долота, и тем самым

позволит исключить вероятность преждевременного интенсивного износа отдельных резцов.

Анализ конструкции алмазных долот показал, что для бурения скважин в различных горно-геологических условиях применяется достаточно широкая номенклатура бурового инструмента, каждый типоразмер которого характеризуется определенной геометрией рабочих лопастей с разным числом PDC-резцов, расположенных в торцевой части инструмента на заборном конусе или ориентированных в радиальном направлении по цилиндрической образующей корпуса. Широкая номенклатура и небольшие объемы выпуска, определяют мелкосерийный тип производства алмазных долот. При этом, как видно из обзора технологий их производства, процесс изготовления является многостадийным и включает значительный объем сборочных операций, выполняемых вручную с использованием термической сварки и капиллярной пайки.

Рабочие лопасти долота имеют достаточно сложный криволинейный профиль, на всем протяжении которого выполнены гнезда для посадки резцов в строго заданных позициях и направлениях относительно оси корпуса инструмента и поверхности резания. При этом радиальное биение резцов калибрующей части, их позиционная точность регламентируется стандартом достаточно жесткими параметрами до 0,2...0,3 мм [1].

Большое число сборочных операций, низкий уровень автоматизации технологического процесса изготовления долот, влияние человеческого фактора на точности обработки базовых и исполнительных элементов долота. несовершенство конструкции инструмента не позволяют обеспечить стабильные параметры точности для всех конструктивных элементов и рабочих поверхностей, тем самым опередили цель диссертационной работы и круг задач исследования.

Цель работы – повышение ресурса алмазных долот на основе совершенствования конструкции инструмента и технологии его изготовления,

обеспечивающих требуемые параметры точности базовых и исполнительных поверхностей на этапах механической обработки и окончательной сборки

Достижение поставленной цели возможно при решении комплекса конструкторско - технологических задач, направленных на обеспечение технологичности конструкции долота для условий автоматизированного производства, разработки технологии механической обработки и сборки инструмента с применением современного станочного оборудования и режущего инструментов, с обеспечением требуемых параметров точности базовых и исполнительных поверхностей детали на основе выявления и анализа позиционных связей элементов конструкции алмазных долот, а также моделирования и описания влияния погрешностей установки на формирование заданных требований точности инструмента.

В ближайшей перспективе применение алмазных долот существенно увеличится, так как они имеют ряд преимуществ по сравнению с трехшарошечными долотами по производительности, ресурсу и экономическим соображениям (рис. 1.2)

Рациональная конструкция породоразрушающего инструмента, а также качество его изготовления во многом обеспечивают стабильность и производительность процесса бурения, а также ресурс инструмента. Таким образом, вопросы, касающиеся обеспечения технологичности конструкции, и эксплуатационных характеристик бурового инструмента за счет совершенствования технологии его изготовления в условиях современного металлообрабатывающего производства, имеют существенное как научное, так и практическое значение.

Глава 2 Исследование влияния качества изготовления на работоспособность алмазного долота

2.1 Анализ механики процесса резания-скалывания PDC- резцом

Очевидно, что для повышения ресурса долота необходимо для всех одноименных резцов (внутренних, периферийных, калибрующих), располагаемых на разных лопастях, обеспечить в процессе бурения равные условия нагружения. Тем самым, возможно исключить интенсивный износ отдельных зубков и неравномерное распределение сил резания-скалывания между остальными работоспособными режущими элементами. Соответственно, для этого необходимо обеспечить равную глубину резания для резцов, исключая условия переменного резания и тем самым, колебания сил резания.

Взаимодействие резца алмазного долота в процессе бурения можно рассмотреть по следующей схеме (рис. 2.1, 2.2). Для оценки влияния параметров режима бурения на глубину резания, необходимо определить направление действия результирующей силы R для установившегося режима резания-скалывания, при котором при неизменных внешних параметрах – осевом усилии и частоте вращения – глубина резания-скалывания породы не меняется [57 - 59].

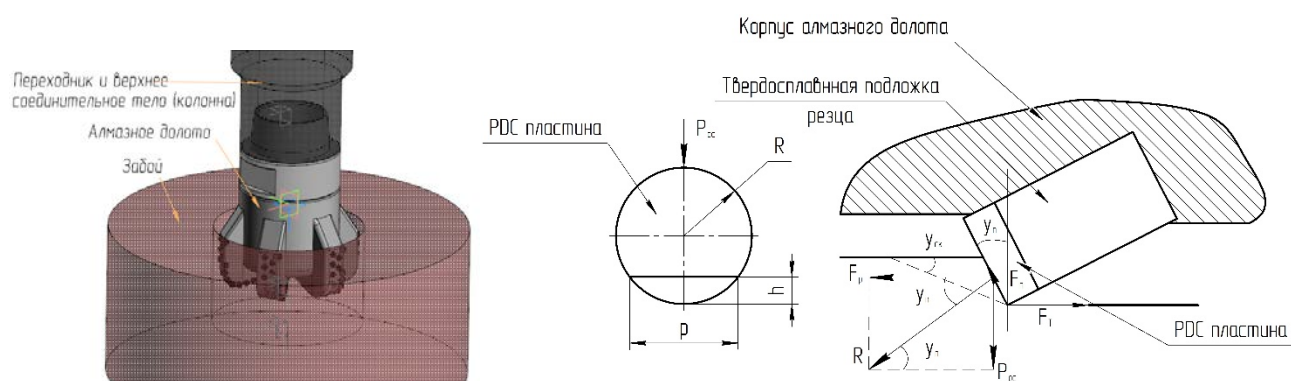


Рисунок 2.1 - Взаимодействие резца алмазного долота с породой в процессе эксплуатации

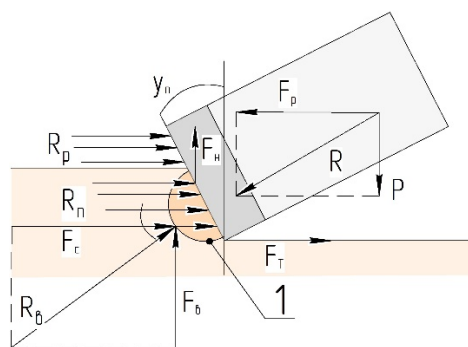


Рисунок 2.2- Схема для анализа процесса резания-скалывания горной породы резцом PDC: 1 – ядро сжатия горной породы

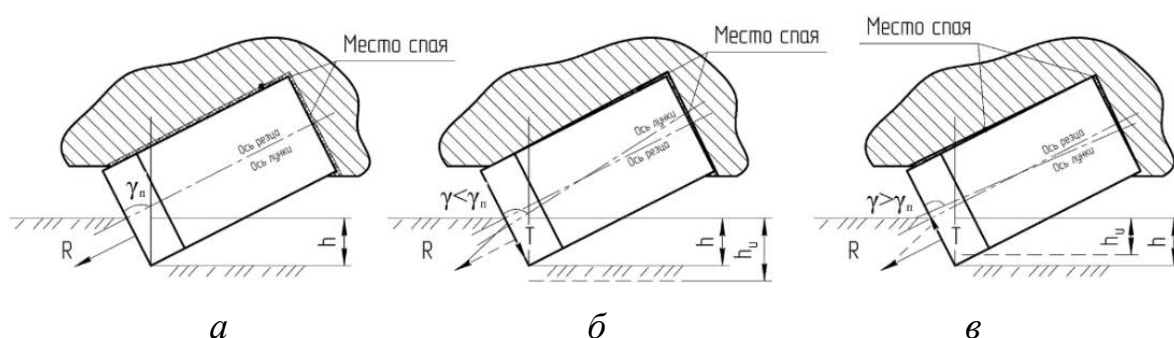


Рисунок 2.3– Влияние позиционных отклонений резца на передний угол γ_n и баланс сил при бурении

Из схемы резания (рис. 2.2 – 2.3) следует, что на плоскость резца, установленного с отрицательным передним углом – γ_n , заглубленного в породу на глубину h и движущегося со скоростью v_p , воздействует сопротивление среды – бурового раствора над забоем R_p и со стороны уже разрушенной, но не до полного состояния разрушения, горной породы R_n .

Усилие R – результирующая осевой силы P_{oc} и тангенциальной силы резания-скалывания породы F_p . (рис. 2.3, б). Если эта сила ориентирована под прямым углом к плоскости резца, то ее проекция на плоскость резца равна нулю. Это режим установившегося процесса без изменения глубины резания-скалывания h (рис. 2.3, а).

В ряде случаев возможно изменение направления результирующей силы R . В частности, при возрастании осевого усилия или при мгновенном снижении усилия резания-скалывания, вызванного, например, ослаблением породы

вследствие появления в ней трещины или каверны, результирующая R будет направлена вниз и не образует прямого угла с плоскостью резца, при этом проекция усилия R и возникающая сила трения T , направленные вниз, нарушат равновесие и вызовет заглубление резца от h к h_n (рис. 2.3, б) [22, 59].

Если результирующая R ориентирована вверх (рис. 2.3, в), что может быть связано со снижением осевого усилия на инструмент или повышением сопротивления породы резанию-скалыванию (рост тангенциального усилия F_p), усилие T будет ориентировано также вверх, что неизбежно вызовет снижение глубины резания-скалывания от h к h_n .

Таким образом, векторная направленность результирующей R , обусловленная изменением осевой силы и (или) тангенциальной силы резания-скалывания, меняет баланс сил при разрушении горной породы и определяет глубину резания-скалывания. Колебания величины и направления силы R при резании-скалывании происходят постоянно, но установившийся режим резания-скалывания при неизменном h возможен только в том случае, если эта сила направлена под прямым углом к плоскости резца [59, 77].

Исходя из условия, что при установившемся режиме резания-скалывания породы резцом PDC усилие R будет направлено под прямым углом к плоскости резца (рис. 2.3, б) [99], равнодействующее усилие R сил резания-скалывания F_p и осевого усилия воздействия на резец P определим из соотношения

$$R = \frac{F_p}{\cos \gamma_n} = \frac{P - F_n}{\sin \gamma_n} \quad (2.1)$$

Из данной формулы следует, что

$$F_p = \frac{P - F_n}{\operatorname{tg} \gamma_n} \quad (2.2)$$

где P_{oc} – осевая нагрузка на резец, Н; F_n – усилие, которое направлено вверх из-за сопротивления среды, действующей на переднюю поверхность резца, Н; γ_n – передний угол установки резца, град.

Таким образом, из формул (2.1) и (2.2) следует, что изменение направления силы R относительно торца алмазного резца может быть вызвано не только

технологическими факторами бурения, но также изменением переднего угла наклона резца γ_n , значение которого зависит исключительно от качества изготовления корпуса и точности позиционирования лунки под каждый резец при сборке.

Если учесть, что на сборных долотах каждая лопасть обрабатывается отдельно (рис. 1.7) и на заключительном этапе приваривается к корпусу, то расположение резцов одной группы на разных лопастях, к примеру, для трехлопастного долота, будет на разных позициях. Т.е. можно предположить, что образуемый передний угол γ_n для резцов на разных лопастях будет несколько отличаться.

Последнее обусловлено погрешностями обработки цилиндрических лунок, в которые припаивают резцы, т.е. их расположением относительно оси долота и базовых поверхностей корпуса. Появление нежелательных отклонений в расположении резцов в гнездах, вызвано многостадийным процессом изготовления долота – обработка корпуса – обработка лопастей и лунок – припаивание резцов - приваривание лопастей – навинчивание и приваривание ниппеля. На каждом из этапов обработки возможно появление погрешностей изготовления лунок, причем как механической, так и термической обработки (термической сварки). Это приводит к нарушению позиционной точности резцов и изменению обратного угла наклона причем для одноименных резцов, расположенных на различных лопастях в разной степени (рис. 2.3 б, в). Данное обстоятельство влияет на величину переднего угла γ_n и, соответственно, на величину тангенциальной составляющей силы резания F_p , рассчитываемой по формуле (2.2), а также на глубину резания-скалывания.

Влияние различных факторов на усилия F_n и F_p описываются выражением

$$F_n = 0,5 v_p^2 \rho_c S C_c \sin \gamma_n \cos \gamma_n \quad (2.3)$$

$$F_p = \frac{\pi \sigma_{ck} h \sqrt{d h}}{\sin \gamma_n} \cos \varphi_p (1 + \operatorname{tg} \varphi) + f(P_{oc} - A \sin \gamma_n) + A \quad (2.4)$$

где $A = 0,125 v_p^2 \rho_c \pi d^2 C_c \cos \gamma_n$.

Таким образом, усилие резания-скалывания F_p зависит от предела прочности породы на скалывание $\sigma_{ск}$, диаметра PDC- резцов d , глубины резания-скалывания породы h , переднего угла резания-скалывания φ_p , внутреннего трения в деформируемых объемах разрушаемой горной породы, коэффициента внешнего трения, плотности среды ρ_c , в которой работает резец, переднего угла установки резца γ_n , а также от линейной скорости перемещения резца по забою v_p^2 .

Глубина резания-скалывания определяется выражением:

$$h = \sqrt[3]{\frac{[(P - A \sin \gamma_n)(1 - f \operatorname{tg} \gamma_n) - A \operatorname{tg} \gamma_n] \sin \gamma_{ск}}{\pi \sigma_{ск} \sqrt{d} \operatorname{tg} \gamma_n \cos \varphi_p (1 + \operatorname{tg} \varphi)}}} \quad (2.5)$$

где $A = 0,125 v_p^2 \rho_c \pi d^2 C_c \cos \gamma_n$,

В формуле (2.5) P характеризует нагрузку на один резец:

$$P = P_{ос} / N \quad (2.6)$$

где $P_{ос}$ – осевая нагрузка на долото; N – число резцов на торце долота.

На рис. 2.4 показана основные силы, оказывающие существенное влияние на глубину резания-скалывания породы резцом PDC.

Из перечисленных параметров, первые три обеспечиваются технологией изготовления инструмента, т.к. обусловлены параметрами точности базовых поверхностей долота и точностью позиционирования исполнительных резцов относительно оси корпуса инструмента и направления резания-скалывания. Поэтому достижение стабильных параметров точности исполнительных поверхностей в процессе изготовления инструмента позволяет обеспечить равное нагружение резцов и соответственно, исключить вероятность интенсивного износа и повреждений отдельных элементов, что положительно скажется на общем ресурсе долот.

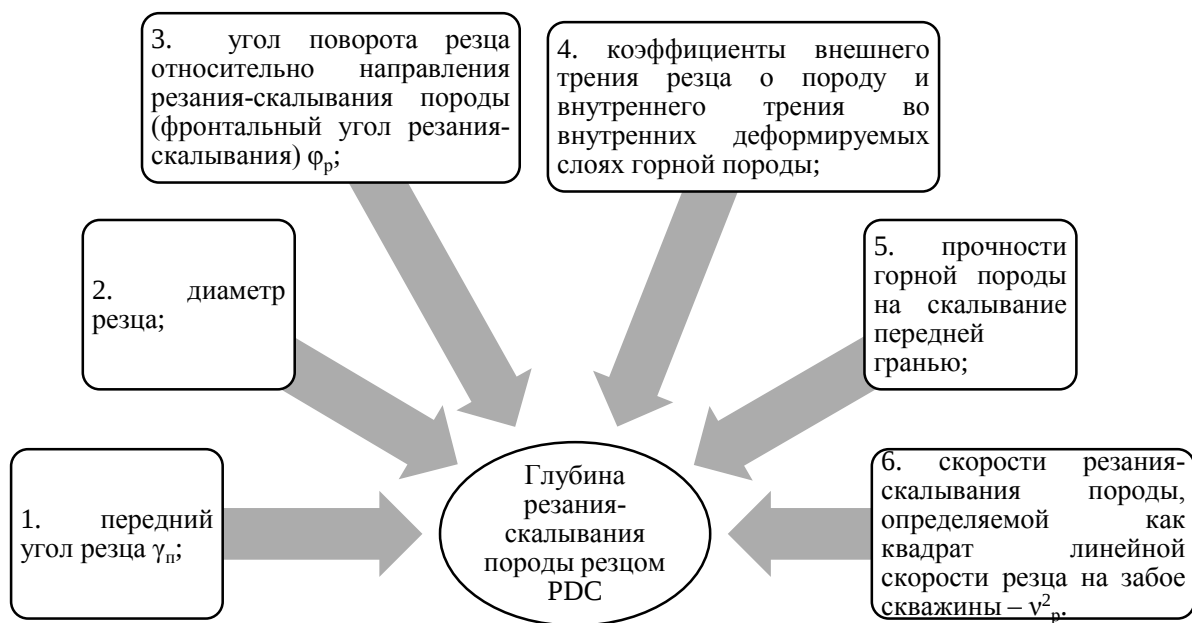


Рисунок 2.4 – Параметры, оказывающие влияние на глубину резания-скалывания породы резцом PDC

Соответственно, уменьшение числа выполняемых технологических операций приведет к снижению суммарных погрешностей и тем самым обеспечению точности обработки гнезд под резцы. Это безусловно будет положительно влиять на правильное позиционирование как торцовых, так и радиальных резцов, следовательно, на кинематику и динамику резания, а также ресурс долота.

2.2 Влияние позиционной точности режущих элементов на баланс сил, воздействующих на PDC-резец

Из приведенного в первой главе анализа следует, что конструкция и качество изготовления породоразрушающего инструмента во многом обеспечивают стабильность и производительность процесса бурения, а также ресурс инструмента. В связи с этим возникает необходимость в выявлении, оценке и выполнении условий достижения показателей качества долот, из которых наиболее весомым показателем является точность бурового инструмента.

Конструкция долота представляет собой сборочную единицу с множеством ориентированных в пространстве отверстий, предназначенных для установки режущих элементов. Профиль режущей части корпуса, материал, из которого он изготавливается, и количество устанавливаемых резцов определяются рядом горно-геологических и технологических факторов, в соответствии со служебным назначением инструмента. Таким образом, при существующей достаточно широкой номенклатуре алмазных долот, каждый инструмент имеет строго определенное назначение. Вместе с тем, требования, предъявляемые к качеству изготовления породоразрушающего инструмента, обусловлены выполнением одной основной задачи, прежде всего, необходимостью обеспечения высокого ресурса алмазного долота. Эта задача может быть решена в том числе на основе обоснования и достижения высоких параметров геометрической точности исполнительных поверхностей инструмента, а значит, путем совершенствования конструкции и технологии изготовления ответственных элементов долот.

Из анализа конструкции и профиля рабочей части долот [58, 77] следует, что в большей степени износу подвержены PDC-резцы периферийной части торца, расположенные от оси долота в радиальном направлении на расстояние $2/3$ радиуса. Износ таких резцов происходит преимущественно по контуру режущей кромки резца в наиболее удаленных от оси точках. Причем степень износа для резцов на разных лопастях, различная. Это обусловлено, прежде всего, большей линейной скоростью периферийных резцов по сравнению со скоростью резцов, располагаемых на конусной носовой части торца. Так например, если линейная скорость точек, располагаемых на оси долота, равна нулю, то, скорость периферийных режущих элементов, определяемая по формуле $V = \pi Dn/60 \cdot 1000$, для долот диаметров $D = 250-300$ мм, при частотах вращения $n = 200..300$ мин⁻¹ будет достигать 4 – 7 м/с. Наряду с этим, вибрации и поперечные колебания, сопутствующие процессу бурения, а также погрешности изготовления инструмента, могут усугублять условия резания-скалывания, вызывая неравномерное нагружение резцов. Поэтому логично, что

снижение интенсивного износа периферийных резцов торца долота позволит повысить общий ресурс инструмента.

Важнейшим условием обеспечения высокого ресурса долота является достижение равномерного нагружения каждой группы резцов, равноудаленных от оси корпуса по его торцевой поверхности, располагаемых на различных лопастях. С этой целью в работе [22, 27, 70] предлагается системно изменять геометрию размещения резцов в корпусе долота по мере уменьшения радиуса вращения каждого резца. При этом особое внимание уделяется углам установки PDC- резцов в лопастях на периферийных и внутренних участках с рекомендациями строгого соблюдения проектных значений угла резания для всех групп резцов относительно собственной динамической плоскости резания.

Из приведенных ранее выражений (2.1) - (2.6) ясно, что изменение переднего угла резца γ_n оказывает существенное влияние на величину составляющей силы резания и глубину резания при установившемся режиме бурения. Исходя из (2.2) для двух равноудаленных от оси корпуса резцов, установленных на разных лопастях, имеет место соотношение:

$$\frac{F_{p1}}{F_{p2}} = \frac{tg\gamma_{n2}}{tg\gamma_{n1}} \quad (2.7)$$

Из соотношения (2.7) ясно, что даже при незначительной разнице углов γ_{n1} и γ_{n2} на двух резцах, сила резания-скалывания F_p также меняет свое значение.

В свою очередь, угол γ_n равен обратному углу наклона резца по отношению к поверхности забоя α , выполняющего функцию заднего угла (рис. 2.2), необходимого для снижения сил трения между цилиндрической частью алмазной пластины (или твердосплавной матрицей) и поверхностью резания.

Исходя из этого, формулу (2.7), можно записать в виде

$$\frac{F_{p1}}{F_{p2}} = \frac{tg\alpha_2}{tg\alpha_1} \quad (2.8)$$

Из формулы (2.8) вытекает, что величины сил резания-скалывания на двух разных пластинах зависят от обратного угла установки (заднего угла) резца α .

Поэтому при изготовлении инструмента важно минимизировать это расхождение. Зная возможные допустимые параметры изменения угла, не

вызывающие резкое изменение силы резания и глубины резания (выражение 2.4 – 2.5), представляется возможным обосновать допустимые позиционные отклонения режущих резцов, базовых поверхностей установочной лунки и корпуса долота (рис. 2.5).

Из рисунка 2.5 очевидно, что изменение переднего угла γ_n в пределах $28..32^\circ$ вызывает рост силы резания-скалывания. Данные графики получены с использованием формулы (1.2) для периферийных резцов долота, взаимодействующих с твердыми породами. В этом случае, отрицательный передний угол рекомендуется выдерживать около 30° что обеспечивает требуемую стойкость резца и наиболее благоприятные условия контакта с твердыми породами.

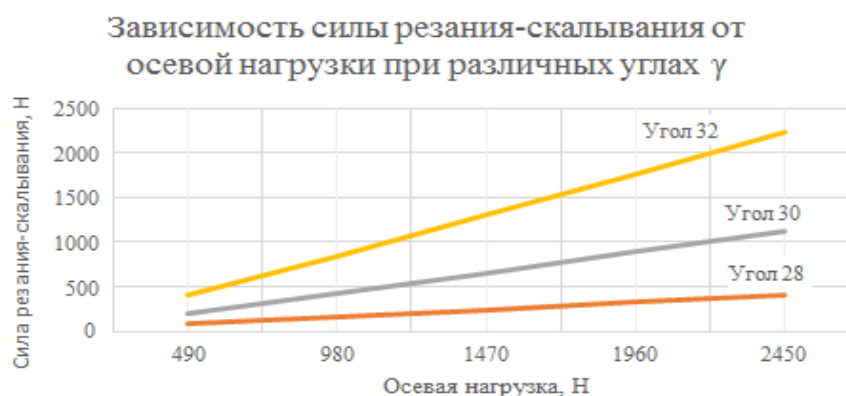


Рисунок 2.5 - Изменение силы резания-скалывания при различных углах γ_n

Допустим, что резцы одной группы, принадлежащие разным лопастям и равноудаленные от центра долота, установлены с небольшой погрешностью, примерно в 2° , обусловленной издержками технологии изготовления. Тогда, при одной и той же осевой нагрузке на резец и при неизменных остальных параметрах, сила резания скалывания для двух резцов одной группы будет различной. Причем с ростом осевой нагрузки эта разница монотонно увеличивается. Очевидно, что ресурс у двух разных резцов будет неодинаковым.

Моделирование контактных условий взаимодействия алмазного резца с твердой породой – гранитом, указывает на постепенный рост напряжений в контактной области в зависимости от изменения переднего угла. Так, при

изменении угла с 28 до 29 градусов, напряжения увеличиваются с 1980 МПа до 2010 МПа, а при значении угла 30 градусов уже составляют 2040 МПа (рис. 2.6.).

Симуляция статического контакта резца с породой при помощи ПО SolidWorks показала, что напряжения концентрируются в средней части резца (рис. 2.7), распространяясь в зону твердосплавной матрицы. Таким образом, незначительное изменение угла γ_n может привести к отрыву пластины и ее выпадению, либо к выкрашиванию кромки, что является наиболее неблагоприятным развитием события.

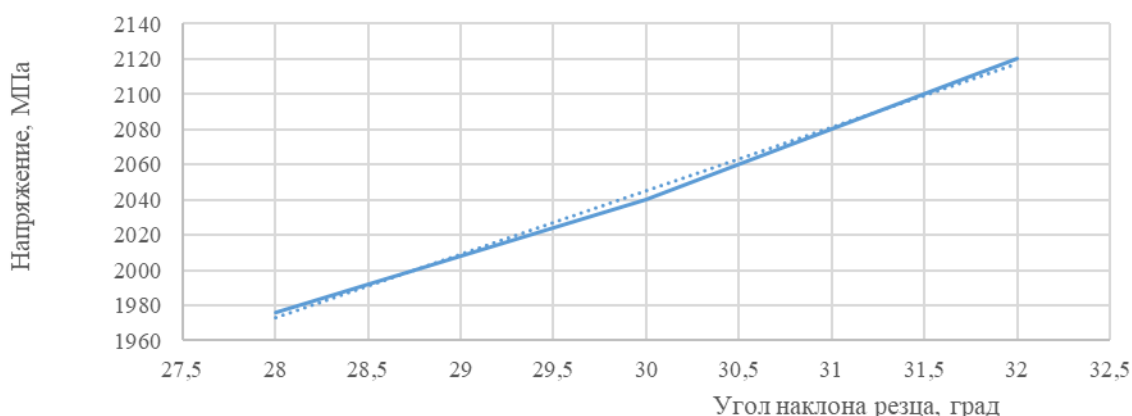


Рисунок 2.6 – Изменение напряжений в алмазной пластине в зависимости от переднего угла при силе резания-скалывания 5кН.

Потеря пластины существенно нарушает баланс сил, воздействующих на режущую часть инструмента, и вызывает интенсивное изнашивание оставшихся элементов.

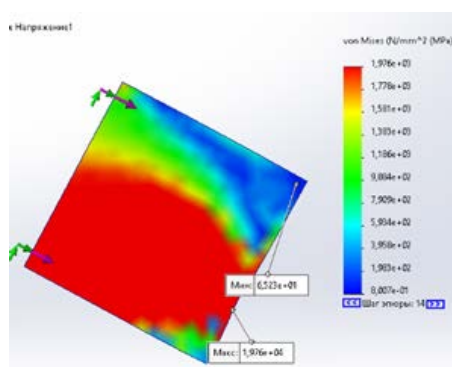


Рисунок 2.7 – Распределение напряжений по поверхности твёрдосплавной матрицы при угле γ_n 32°.

При моделировании условий контакта принимались следующие входные параметры. Для PDC- резца: предел прочности при сжатии $\sigma_{сж} = 2000$ МПа, предел прочности при изгибе $\sigma_{и} = 200$ МПа, предел прочности при растяжении $\sigma_{в} = 79000$ МПа. При этом прочность породы принималась равной 180 МПа.

Угол γ_n напрямую зависит от точности изготовления лунки под резец, а именно ее внутренней цилиндрической и торцевой поверхностей, по которым происходит установка резца и его позиционирование относительно диаметральной плоскости долота, проходящей через центр зубка, и оси корпуса. Таким образом, на угол γ_n оказывает влияние формируемая при изготовлении корпуса и сборки инструмента положение оси резца относительно оси лунки, точность радиального положения резца относительно оси долота, а также точность изготовления торцевой поверхности корпуса. Торцевая поверхность является основной конструкторской базой корпуса, наряду с резьбовой поверхностью, по которой корпус соединяется с ниппелем.

2.3. Влияние качества изготовления на ресурс алмазного долота

Эксплуатационные требования, предъявляемые к алмазным долотам, требуют соблюдения достаточно жестких регламентов при выполнении этапов механической обработки базовых и исполнительных поверхностей корпуса долота, окончательной сборки инструмента, упрочняющей обработки поверхности и сварочных работ. Однако, в технологической документации по изготовлению долот для ряда исполнительных поверхностей корпуса важные технические требования по точности изготовления порой либо не указываются, либо, эти требования принимаются без должного их обоснования.

В работе [69], авторы утверждают, что износ считается предельным, если превышает удвоенное значение допуска на наружный диаметр. Так, для долота диаметром $\varnothing 215,9^{+0,51}$ мм величина предельного износа принимается равной 1,02 мм [70], рис. 2.8. Таким образом, новое долото, диаметральный размер которого соответствует минимально допустимому диаметру $\varnothing 215,39$ мм, будет считаться предельно изношенным уже при $\varnothing 214,37$ мм. В связи с этим для обеспечения

высокого ресурса авторами рекомендуется изготавливать новые долота с максимальным предельным диаметром $\varnothing 215,9$, что при существующей технологии производства выполнить достаточно сложно. Принимая во внимание имеющиеся допуски на основные элементы инструмента – габаритные и посадочные размеры корпуса, ниппеля, лопастей, а также лунок под резцы – выполнить данное требование практически невозможно, так как.

$$\{T_{\varnothing} = 0,51\} \leftrightarrow \{(0,3), (0,7); (0,2)\},$$

где допуск $T_{\varnothing}$ – это погрешность изготовления $\omega_{\varnothing}$, равная сумме погрешностей механической обработки корпуса $\omega_{м.о.к}$ и лопастей $\omega_{м.о.л}$, приваривания лопастей к корпусу $\omega_{св.}$, установки резцов в отверстия лопастей в процессе пайки $\omega_{п}$ и погрешность установки корпуса в ниппель $\omega_{сб.}$:

$$\omega_{\varnothing} = \omega_{м.о.к} + \omega_{м.о.л} + \omega_{св.} + \omega_{п} + \omega_{сб.}$$

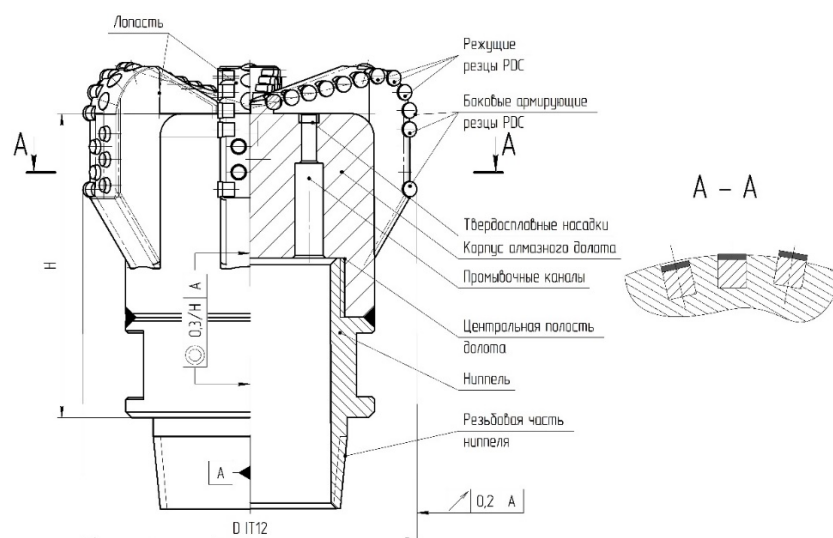


Рисунок 2.8 – Основные параметры алмазного долота

Погрешности, формируемые в процессе изготовления корпуса, в частности, в процессе механической обработки его базовых поверхностей и лунок под резцы, приводят к достаточно большому разбросу параметров выступания резцов над поверхностью лопасти корпуса (рис. 2.8, сечение А-А)). Согласно данным [26], алмазные резцы производят порошковой металлургией с допуском по длине до $-0,1$ мм. В то же время, допуск на отверстие под зубки составляет $+0,13$ мм. В случае установки резца с минимально предельной длиной

в лунку с максимально предельной глубиной величина отклонения его кромки в радиальном направлении от максимально допустимого диаметра корпуса долота составит 0,23 мм, что практически равно допуску на диаметр и приведет к получению минимального предельного размера долота. Соответственно, ресурс данного инструмента будет существенно ниже, практически на треть.

При максимальном выступе резца (рис. 2.8., сечение А-А, 3) на практике производят его шлифование до требуемого максимального диаметра, что негативно сказывается на стойкости пластины и приводит к образованию трещин.

Для решения этой задачи, т.е. для устранения разновысотности резцов по диаметру, в работе [69], предложено оси отверстий под зубки выполнять под углом от 2 до 6° к армируемой поверхности, или же рабочие торцевые поверхности боковых PDC – пластин выполнять наклонными под тем же углом относительно оси отверстий.

Говоря о роли размерной точности и методах ее достижения, авторы не акцентируют внимание на другом важном параметре, величина которого во многом определяет стабильные условия эксплуатации долота и точность формируемой скважины. Этот параметр – радиальное биение зубков, зависящий от точности формы исполнительных поверхностей и относительного их расположения от базовых поверхностей долота.

На радиальное биение определяющее влияние оказывают:

- точность резьбового соединения корпуса с ниппелем, в частности формируемый в соединении зазор;
- разновысотность зубков, обусловленная, точностью сборки соединений «резец-корпус».

Применяемые для упрочнения корпуса термические способы наплавки твердосплавных покрытий также приводят к появлению погрешностей формы вследствие интенсивного нагрева лопастей. Наплавка производится на заключительных этапах перед пайкой резцов, т.е. после выполнения механической обработки, в ходе которой были достигнуты требуемые

параметры размерной точности отверстий и их позиционная ориентация относительно торца и оси корпуса. Температурное воздействие, оказываемое наплавкой на упрочняемые элементы корпуса, сопоставимы с температурным воздействием при полной закалке, что неизбежно приводит к появлению погрешностей по причине коробления формы в пределах 0,08...0,12 мм в зависимости от размеров лопастей. Тем самым нарушается позиционная точность лунок под резцы, достигнутая на операциях механообработки. В связи с этим, из методов упрочнения корпуса желательно использовать те, что не вызывают активное температурное влияние на материал детали.

Наряду с этим, процесс пайки, вносит свои погрешности в угловое расположение резца относительно оси лунки и оси корпуса. Максимальный заполняемый припоем зазор не превышает 0,1 мм. Это значение можно рассматривать как радиальное биение зубка относительно оси лунки или отклонение от параллельности рассматриваемых осей зубка и лунки.

Ниже приводится разработанная методика оценки ресурса долота по величине углового отклонения колонны относительно требуемой оси.

Ресурсом долота типа буровое алмазное долото (БАД) является продолжительность (время) безотказной работы инструмента при решении определенных технологических задач бурения скважин. Ресурс долота считается исчерпанным, когда инструмент становится неработоспособным в результате возникновения одного или совокупности нескольких факторов, (см. рис. 1.10). Такими причинами являются неравномерный износ режущих зубков, выпадение зубков и др. К числу факторов, по которым может быть зафиксирована потеря работоспособности долота, относятся также технологические факторы, определяющие отклонения геометрических параметров пробуренных скважин. Такими факторами являются:

- увод оси пробуренной скважины от требуемого углового положения;
- линейное смещение центра скважины;
- увеличение диаметра скважины в результат ее разбиения (линейного смещения центра и углового отклонения).

В практике бурения с помощью одного и того же долота могут последовательно успешно решаться разные технологические задачи. И, в частности задачи поочередного бурения скважин на разную глубину от 40 м до 3000 м (а иногда и более метров) в породах различной крепости. В соответствии с этим ресурс долота T_p определяется как суммарная продолжительность времени безотказного бурения при последовательном выполнении задаваемых технологических задач:

$$t_p = \sum_{i=1}^{i=n} t_i \quad (2.9)$$

где t_i - ресурс долота, затрачиваемый на выполнение определенной технологической задачи бурения;

n – количество технологических задач, решаемых за период полного использования ресурса работы долота.

В процессе бурения на требуемую глубину длина бурильной колонны L_k периодически возрастает путем прибавления длины бурильных труб

$$L_k = \sum_{i=1}^{i=k} l_T \quad (2.10)$$

где l_T - длина бурильной трубы;

k – число установленных бурильных труб.

Если известно число установленных бурильных труб, то ресурс t_p долота при решении рассматриваемых задач составит

$$t_p = \sum_{i=1}^{i=k} \tau_i \quad (2.11)$$

где τ_i - время проходки на глубину одной бурильной трубы;

k – число установленных бурильных руб.

При установке нового долота на первую бурильную трубу в зоне бурения устанавливаются начальные, высокие параметры геометрической точности бурового инструмента, полученные в результате его изготовления.

Важнейшим из таких параметров является точность углового совпадения γ [град.], оси цилиндра режущих алмазных зубков с осью базовой конической резьбы ниппеля. Начальное угловое отклонение $\Delta_{\text{ун}}$ на новом долоте должно

быть получено при его изготовлении. Однако в процессе бурения в результате потери режущих свойств долота угловое отклонение возрастает и достигает допустимого предельного значения

$$\Delta_y = \Delta_{yпр} \quad (2.12)$$

Если известны, начальное угловое отклонение $\Delta_{yн}$ (перекос осей [град.]) нового установленного долота и интенсивность приращения углового отклонения при бурении Δ_{yi} (угловое отклонение на единицу длины бурения [град/м]), то угловое отклонение осей в текущий момент времени Δ_y [град.], когда пробурена скважина глубиной L [м], составит

$$\Delta_y = \Delta_{yн} + \Delta_{yi} \cdot L \quad (2.13)$$

Интенсивность приращения углового отклонения при бурении Δ_{yi} представляет собой частную производную углового отклонения от длины бурения

$$\Delta_{yi} = \frac{\partial y}{\partial L}$$

Достижение предельного углового отклонения $\Delta_y = \Delta_{yпр}$ (предельного перекаса осей) означает достижение момента полного использования ресурса долота. В результате требуется остановить бурение, вывести колонну и заменить долото.

Для определения численного значения ресурса долота находим из выражения (2.13) длину пробуренного отверстия

$$L = \frac{\Delta_{yпр} - \Delta_{yн}}{\Delta_{yi}} \quad (2.14)$$

А затем, представим длину скважины L как произведение осевой подачи бурения s [мм/мин или м/час] на продолжительность бурения t_p [мин], равное ресурсу долота

$$L = s \cdot t_p \quad (2.15)$$

В результате ресурс долота при выполнении данной задачи бурения можно рассчитать по формуле

$$t_p = \frac{L}{s} \quad (2.16)$$

или с учетом выражения (2.14) получим

$$t_p = \frac{\Delta_{уп} - \Delta_{ун}}{\Delta_{уи}} \cdot \frac{1}{s} \quad (2.17)$$

где $\Delta_{уп}$ - допускаемое предельное угловое отклонение (предельный перекося осей [град.]);

$\Delta_{ун}$ - начальное угловое отклонение осей [град.];

$\Delta_{уи}$ - интенсивность приращения углового отклонения в процессе бурения [град./м];

s - осевая подача бурильной колонны [м/час].

Таким образом, ресурс долота напрямую зависит от качества его изготовления - от соосности оси алмазных зубков (оси корпуса) с осью резьбы ниппеля и от величины углового отклонения оси режущих зубков относительно оси резьбы ниппеля (радиального биения). В процессе бурения происходит систематическое увеличение отклонений этих параметров до предельных значений, при которых возникает предельно допускаемый увод оси пробуренного отверстия и его разбиение. Чем выше достигнутая при сборке точность указанных параметров и ниже интенсивность приращения их отклонений в процессе бурения, тем выше ресурс работы долота.

В качестве предельного ограничительного фактора рассматривались угловые отклонения Δ_y , интенсивность приращения которых определялась как частная производная

$$\Delta_{уи} = \frac{\partial y}{\partial L}$$

Однако аналогичные расчеты ресурса работы долота можно выполнить при рассмотрении в качестве предельного ограничительного фактора отклонение от соосности Δ_c оси алмазных зубков (оси корпуса) относительно оси резьбы ниппеля. Интенсивность приращения этих линейных отклонений в процессе бурения $\Delta_{си}$ также определяет частная производная

$$\Delta_{cu} = \frac{\partial c}{\partial L} C \quad (2.18)$$

Если известны начальное $\Delta_{сн}$ и допускаемое предельное $\Delta_{спр}$ смещения осей, то аналогично выражению (2.17) для расчета ресурса долота можно использовать формулу (2.19)

$$t_p = \frac{\Delta_{спр} - \Delta_{сн}}{\Delta_{cu}} \cdot \frac{1}{s} \quad (2.19)$$

где s - осевая подача бурильной колонны [м/час].

В процессе бурения имеет место одновременное формирование как угловых Δ_y , так и линейных Δ_c , отклонений. В соответствии с этим, момент выработки ресурса работы долота T_{py} (по угловому отклонению) или T_{pc} (по линейному отклонению) может наступить при достижении одного из предельных отклонений - углового $\Delta_{упр}$ или линейного Δ_c

$$(\Delta_y \rightarrow \Delta_{упр} \rightarrow T_{py}) \quad (\Delta_c \rightarrow \Delta_{спр} \rightarrow T_{pc})$$

Исследованиями влияния качества соединений деталей на их ресурс занимались выдающиеся ученые Московского горного университета профессора Г.И. Солод и Я.М. Радкевич. Согласно предложенной теории, в качестве показателя качества соединений деталей принимается полученный при сборке зазор S , определяющий особенности контакта деталей по сопрягаемым поверхностям [83, 84, 87]. Предполагается, что при эксплуатации зазоры в соединениях увеличиваются до максимально предельной величины $S_{пр}$, которая определяет их эксплуатационный ресурс. Таким образом, соединения с минимальными допустимыми зазорами S_{min} , будут иметь больший эксплуатационный ресурс:

$$\frac{T}{T_{max}} = \frac{S_{пр} - S}{S_{пр} - S_{min}} < 1 \quad (2.20)$$

где T – фактический ресурс соединения;

T – максимальный ресурс соединения;

Исходя из этого, авторами была разработана методика по оценке качества соединений деталей, основные положения которой сводятся к следующему [87]:

- при оценке уровня качества соединения учитываются погрешности измерения (Δ);
- уровень качества соединения равен единице, если зазор в соединении равен минимально допустимой по технической документации величине, т.е. $K=1$ при $S=S_{\min}$;
- уровень качества соединения близок к нулю, если зазор в соединении равен максимальной величине, т.е. $K \rightarrow 0$ при $S=S_{\max}$;
- зависимость между уровнем качества и величиной зазора является квадратичной (рис. 2.9).

Уровень качества соединения определяется по формуле:

$$K = 1 - \left(\frac{S - S_{\min}}{ITS + \Delta} \right)^2 = 1 - \frac{(S - S_{\min})^2}{(1,05ITS)^2} \quad (2.21)$$

где ITS – допуск на зазор; S – зазор в соединении, полученный при сборке. Величина погрешности измерения (Δ) определяется в соответствии с рекомендациями ISO – 5725 и принимается равной $\Delta=1,05$.

Таким образом, в соответствии с формулой (2.21) уровень качества будет тем выше, чем ближе, полученный при сборке зазор (S) к минимально допустимому зазору ($S_{\min}$), соответствующему функциональному назначению соединения.

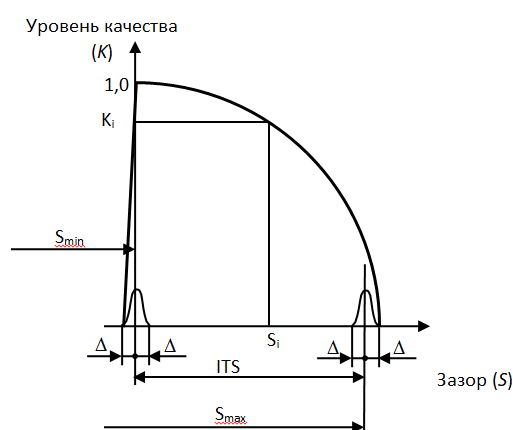


Рисунок 2.9 - Схема определения уровня качества соединения с зазором

Для установления взаимосвязи ресурса с уровнем качества соединения уравнение (2.21) приводится к виду:

$$S = 1,05ITS\sqrt{1-K} + S_{\min}.$$

С учетом данного выражения формула (2.20), принимает вид [84]:

$$\frac{T}{T_{\max}} = 1 - \frac{1,05ITS\sqrt{1-K}}{S_{\text{пр}} - S_{\min}} = 1 - \frac{1,05ITS\sqrt{1-K}}{ITS_p} = 1 - \frac{1,05\sqrt{1-K}}{K_p} \quad (2.22)$$

где $K_p = ITS_p/ITS > 1$ – коэффициент запаса ресурса соединения по точности;
 ITS – допуск на зазор при сборке соединения (при изготовлении гидроцилиндра);
 $ITS_p = S_{\text{пр}} - S_{\min}$ – эксплуатационный допуск на зазор в соединении.

Зависимость ресурса от уровня качества соединения при различных значениях коэффициента K_p представлена на рис. 2.10 [83, 88]. При уровне качества соединения $K = 1$, зазор в соединении равен $S = S_{\min}$, а отношение $T/T_{\max} = 1$. В этом случае ресурс соединения будет равен максимально возможному значению. Если уровень качества соединения близок к нулю, то отношение $T/T_{\max} = 1 - 1,05 ITS / ITS_p = 1 - 1,05/K_p$, и ресурс соединения минимален [31].

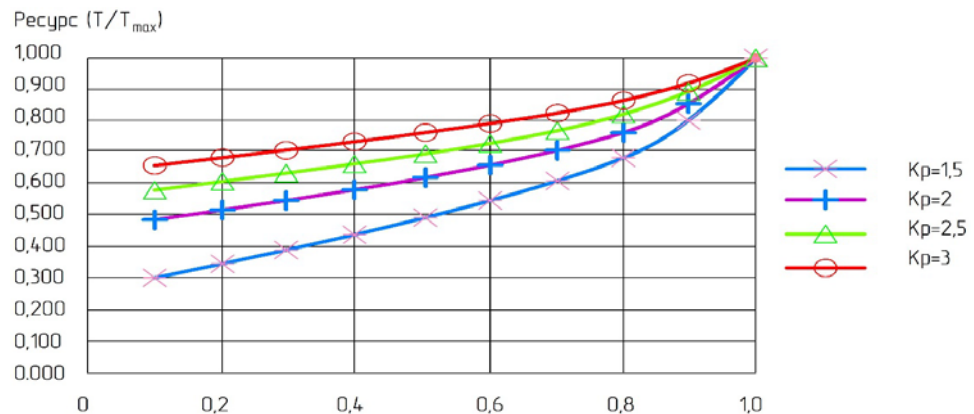


Рисунок 2.10 - Зависимость ресурса соединения от его уровня качества

Зависимость, представленная на рис. 2.10, универсальна. Из нее следует, что ресурс соединения близок к максимально возможной величине при уровне качества $K \geq 0,9$. Таким образом, если в ответственных соединениях алмазного долота, в частности, в резьбовом, влияющем на радиальное биение, обеспечить минимальные зазоры, то ресурс инструмента может приблизиться к максимальному значению. Поэтому необходимо рассмотреть основные методы обеспечения точности на этапах механообработки и сборки соединений.

2.4 Выводы по главе 2

1. На основе анализа механики разрушения горных пород алмазными долотами выявлены особенности кинематики и динамики процесса резания-скалывания и основные параметры, характеризующие баланс сил резания-скалывания при бурении – передний угол γ_n и глубина резания h .

2. Установлено, что отклонение от позиционной точности резцов одной группы, располагаемых на разных лопастях корпуса, приводит к росту сил резания-скалывания, тем самым, вызывая неравномерное их нагружение. Изменение угла на 2 градуса вызывает изменение напряжений с 1980 МПа до 2240 МПа. При этом, напряжения, возникающие в алмазной пластине при угле $\gamma_n = 30^\circ$ (для твердых пород), концентрируются, преимущественно, в ее средней части и на границе с твердосплавной матрицей. При наличии сил трения эти напряжения могут привести к выкрашиванию режущих частиц.

3. Установлено, что на ресурс долота существенное влияние оказывают параметры точности, достигаемые при изготовлении инструмента. В частности, существенное влияние на работоспособность долота оказывает радиальное биение режущих кромок относительно оси резьбы ниппеля, а также соосность корпуса и ниппеля. Предложена методика оценки ресурса долота в зависимости от углового совпадения α [град.] оси цилиндра режущих алмазных зубков с осью базовой конической резьбы ниппеля.

4. Выявлены зависимости, устанавливающие связь ресурса инструмента с качеством его изготовления, с помощью которых представляется возможным оценить влияние точности и уровня качества соединений на работоспособность алмазного долота. При этом за основной критерий оценки качества принимаются минимальные зазоры в соединениях, достигаемые при сборке.

Глава 3 Технологическое обеспечение качества алмазного долота

3.1 Обоснование конструкции алмазного долота для условий автоматизированного производства

Требуемую позиционную точность резцов на всех лопастях возможно получить при обработке всех лунок с одного установа, принимая в качестве технологических баз конструкторские базы корпуса. Реализовать этот подход можно заменой сборной конструкции корпуса на цельнометаллическую, применением современной многокоординатной обработки и автоматизацией сборочных операций, тем самым существенно сократив формируемые погрешности обработки элементов долота.

За последнее десятилетие большое признание в машиностроении приобрела концепция проектирования изделий DFMA (Design for Manufacture and Assembly). В соответствии с основными принципами методики DFMA число деталей в сборочной единице должно быть рациональным с точки зрения сборки – (модуль DFA); механической обработки (модуль DFM) и конкурентоспособности (модуль DFC).

Эффективность процесса сборки в зависимости от уровня сложности конструкции определяет модуль DFA:

$$DFA = \left(\frac{3NM}{TM} \right) 100\%,$$

где NM – характеризует минимальное число деталей, необходимых для выполнения сборочной единицей ее служебного назначения; TM – отражает общее прогнозируемое время сборки; числовой показатель 3 - характеризует время сборки, затрачиваемое на одно соединение (принимается 3 с) [75, 102].

В соответствии с принципами концепции DFMA конструкция сборного корпуса является нетехнологичной.

Согласно ГОСТ 26474-88, допуск наружного диаметра АД варьируется в пределах от 0,42 до 0,19 мм, причем с увеличением диаметра инструмента предельные отклонения уменьшаются, что отвечает достаточно жестким

требованиям точности. Значительный объем слесарно-сборочных и пригоночных работ, выполняемых вручную при изготовлении сборного корпуса долота, а также необходимость выполнения сварочных операций сильно увеличивают трудоемкость изготовления и влияние человеческого фактора на стабильность требуемых параметров точности. Отсутствие автоматизации на этапах изготовления инструмента также влияет на его себестоимость и качество изготовления.

Принимая во внимание современный уровень развития металлообрабатывающей отрасли и степень автоматизации машиностроительного производства представляется целесообразным заменить сборную конструкцию корпуса долота на цельную и разработать более рациональный технологический маршрут его изготовления с применением средств автоматизации на этапах механообработки корпуса и сборки готового изделия.

Предложение по совершенствованию конструкции и технологии изготовления изделий должно быть обосновано с позиции производственной технологичности, которая характеризует совокупность свойств конструкции изделия, позволяющих изготовить его наиболее эффективным способом с минимальными затратами материального труда и средств. При этом оценку технологичности принято проводить по качественным и количественным показателям [2, 3] как для сборочной единицы, т.е. изделия в целом, так и отдельных деталей.

Качественная оценка технологичности предваряет количественную, определяя ее целесообразность. При этом анализ проводят по ряду признаков или показателей, характеризующих приспособленность изделия для изготовления в конкретных производственных условиях. Так, технологичность изделий, предназначенных для изготовления в условиях автоматизированного производства, оценивается приспособленностью конструкции детали к обработке с минимальным числом операций и установов, с использованием высокопроизводительных режимов обработки. В связи с этим, конструкция

детали должна характеризоваться жесткостью, иметь удобные базовые поверхности, и в большей части симметричную форму. Допускается значительное число повторяющихся простых элементов, пазов и отверстий. Особые требования предъявляются к глухим отверстиям, ориентированным под различным углом к базовым поверхностям, их диаметры должны соответствовать нормальному ряду размеров. Размеры поверхностей на таких деталях задают и обеспечивают координатным методом, система простановки размеров должна соответствовать особенностям обработки на станках с ЧПУ. Все перечисленные признаки присутствуют в корпусе долота. Таким образом, по качественным показателям его конструкция для условий автоматизированного производства является вполне технологичной.

При качественной оценке алмазного долота как многоэлементной сборочной единицы определяем соответствие его конструкции следующим требованиям, представленными на рис. 3.1 [2].

Требования при качественной
оценке алмазного долота

- наличие минимального числа деталей;
- обеспечение точности замыкающих звеньев размерных цепей методом полной взаимозаменяемости;
- наличие надежных установочных баз и баз для ориентации деталей;
- удобство подвода автоматического сборочного инструмента в зону обработки;
- уровень унификации элементов собираемых деталей и сопряжений;
- характер и размеры сопряжений;
- количество направлений движений, выполняемых при сборке;
- наличие на сопрягаемых поверхностях центрирующих элементов, поясков, фасок;
- компоновка изделия должна позволять установку комплектующих деталей при помощи простых движений.
- для конусных соединений не рекомендуется сопрягать детали по нескольким поверхностям.

Рисунок 3.1 - Требования при качественной оценке алмазного долота

По всем перечисленным требованиям конструкция долота является технологичной за исключением первого и седьмого, так как в корпус долота устанавливается достаточное число алмазных резцов, имеющих разную ориентацию относительно базовых поверхностей. Это несколько осложняет

автоматизацию пайки резцов, так как требует создание специального оборудования.

Корпус долота имеет симметричную форму, поэтому не требует введения дополнительных "ложных" элементов, не требуемых служебным назначением детали. Корпус вполне удобен для транспортирования, так как имеет достаточно развитую площадь установочной базы.

Для оценки целесообразности предложенного решения необходимо выполнить сравнительный количественный анализ показателей технологичности конструкции изделий (ТКИ) - базового сборного корпуса долота и предлагаемого варианта монолитного корпуса.

3.2 Количественная оценка технологичности конструкции цельнометаллического корпуса долота

Для количественной оценки свойств конструкции корпуса алмазного долота воспользуемся регламентированной ГОСТ 14.201–83, 14.205–83 единой системой показателей, обязательной для анализа конструкции, изготавливаемых в автоматизированном производстве изделий.

Существуют частные, комплексные и базовые показатели технологичности конструкции.

Комплексные показатели определяют группу свойств технологичности конструкции, которые могут характеризоваться одним комплексным показателем, обобщающим группу частных показателей или характеризующие различные виды технологичности [10, 102]. При этом предварительно определяют сравнительную значимость частных показателей, которая зависит от видов изделия, условия выполнения работ и объема производства.

Технологичность конструкции изделия (производственная технологичность) определяют при помощи основных и дополнительных показателей. К первой группе относят трудоемкость T , ч; себестоимость C , руб., а также уровень технологичности по трудоемкости изготовления $K_{\text{ти}}$ и уровень технологичности по себестоимости $K_{\text{си}}$. Дополнительными показателями

являются коэффициенты, оценивающие: уровень стандартизации ($K_{ст}$) и унификации ($K_{ун}$); повторяемости ($K_{пов}$) изделий; наличие установочных единиц ($K_{уст}$); методы, обеспечивающие точность замыкающего звена ($K_{вз}$); уровень механизации и автоматизации установки ($K_{мех}$; $K_{авт}$) и т.д. Пределы большинства показателей одинаковы:

$$0 \leq K_i \leq 1.$$

Из числа основных показателей одним из важнейших является технологическая трудоемкость изделия T , так как она во многом определяет себестоимость как сборочной единицы, так и отдельных деталей.

Известно, что технологическую трудоёмкость изготовления изделия $T_{аи}$ определяют по сумме нормочасов, затраченных на проведение технологических операций заготовительного производства, механообработки, термообработки, сборки и дополнительного упрочнения изделий. Таким образом, для алмазного долота, изготавливаемого по базовой технологии, можно вывести следующую формулу:

$$T_{ад} = T_{к.с} + T_{н} + T_{а.р.} + T_{о.сб} + T_{и}, \quad (3.1)$$

где $T_{к.с}$ – трудоемкость изготовления корпуса в сборе с резцами;

$T_{к}$ – трудоемкость изготовления ниппеля;

$T_{а.р.}$ – трудоемкость изготовления алмазных резцов;

$T_{сб}$ – трудоемкость общей сборки корпуса с ниппелем;

$T_{и}$ – трудоемкость испытаний долота;

Как уже было отмечено в первой главе, варианты конструкций и технологий изготовления корпуса могут быть различными. Наибольшее распространение получили корпуса со сварными лопастями.

Для трудоемкости изготовления сборного корпуса можно записать следующее выражение:

$$T_{к.с} = T_{к} + T_{л} + T_{св.л} + T_{уп} + T_{то} + T_{п.р}, \quad (3.2)$$

где $T_{к}$ – трудоемкость получения заготовки и механообработки корпуса;

$T_{\text{л}}$ - трудоемкость получения заготовки и механообработки лопасти;
 $T_{\text{св.л}}$ – трудоемкость сварки лопастей;
 $T_{\text{уп}}$ – трудоемкость упрочняющей поверхностной наплавки и напыления;
 $T_{\text{то}}$ – трудоемкость термообработки;
 $T_{\text{п.р}}$ – трудоемкость пайки резцов.

В случае изготовления цельнометаллического корпуса, без необходимости изготовления лопастей и их приваривания, формула трудоемкость корпуса в сборе с резцами примет вид:

$$T_{\text{к.с.ц}} = T_{\text{к.ц}} + T_{\text{уп}} + T_{\text{то}} + T_{\text{п.р}}, \quad (3.3)$$

где $T_{\text{к.ц}}$ – трудоемкость изготовления цельнометаллического корпуса.

Из формулы (3.3) видно, что конструкция цельнометаллического корпуса является более технологичной, благодаря исключению дополнительных операций, связанных с необходимостью изготовления лопастей и их пригонки к корпусу при сваривании ручной дуговой сваркой. В том числе, отпадает дополнительная термообработка для снятия остаточных термических напряжений после сварки. Существенное достоинство цельнометаллического корпуса состоит в формировании для всех лунок под резцы равной позиционной точности относительно базовых поверхностей корпуса за счет снижения погрешностей установки, и создании предпосылок для организации автоматизированного производства алмазного инструмента [101].

Оценку целесообразности совершенствования конструкции и технологии изготовления изделий выполняют с использованием другого важного показателя технологичности - уровня технологичности по трудоемкости изготовления, который в общем случае выражают формулой:

$$K_{\text{ут}} = \frac{T_{\text{и}}}{T_{\text{би}}} \rightarrow \min, \quad (3.4)$$

где в числителе трудоемкость изготовления модернизированного варианта конструкции $T_{\text{и}}$, а в знаменателе - базового $T_{\text{би}}$. При этом коэффициент, характеризующей уровень технологичности с каждым очередным этапом модернизации должен стремиться к минимальному значению.

Соответственно, для цельнометаллического корпуса долота можно записать:

$$K_{уТд} = \frac{T_{к.с.ц}}{T_{к.с}} = \rightarrow min, \quad (3.5)$$

Если в формулах (3.2) и (3.3) сумму трех последних слагаемых обозначить через C , т.е. принять их неизменными (что также возможно), тогда формулу (3.5) можно представить в следующем виде

$$K_{уТд} = \frac{T_{к.ц} + C}{(T_{к.} + T_{л.} + T_{св.}) + C} = \rightarrow min, \quad (3.6)$$

Откуда очевидно, что цельнометаллический корпус по сравнению со сварным, является более технологичным и создает возможность существенно снизить погрешности изготовления ответственных поверхностей на операциях механообработки и, тем самым, повысить точность соединений и позиционную точность режущих элементов относительно оси долота [2, 60, 61, 89]. Этому способствует также исключение значительного числа пригоночных работ, выполняемых вручную и некоторые операции термообработки, вызывающие коробление форм детали.

3.3 Многоуровневая оценка технологичности конструкции долота

Комплексный показатель технологичности конструкции изделия удобно выражать среднеарифметической величиной с учетом экономической эквивалентности $K_{э.и}$ ("весового" вклада) принятых показателей K_i [96]:

$$K_{\Sigma} = \frac{\sum_{i=1}^n K_i K_{э.и}}{\sum_{i=1}^n K_{э.и}} = \frac{K_1 K_{э.и1} + K_2 K_{э.и2} + \dots + K_n K_{э.ин}}{K_{э.и1} + K_{э.и2} + \dots + K_{э.ин}}, \quad (3.7)$$

где K_{Σ} – комплексный показатель технологичности; K_i – частный показатель технологичности; $K_{э.и}$ – коэффициент экономической эквивалентности i -го частного показателя.

Значения комплексного показателя коэффициентов экономической эквивалентности находятся в тех же пределах, что и частных показателей, то есть $0 \leq K_{\Sigma} \leq 1$; $0 \leq K_{э.и} \leq 1$.

Для объективной оценки уровня автоматизации соединения корпус – ниппель, резец – корпус используем методику расчета комплексных и частных коэффициентов технологичности, при помощи которых можно рассчитать коэффициент автоматизации и оценить влияние конструкции на трудоемкость, себестоимость и производительность.

Согласно приведенной в [102] методике выделяем группы функциональных элементов и исполнительных единиц, оказывающих влияние на выполнение каждого этапа автоматического процесса, и оценим:

- возможность использования различных ориентирующих и подающих устройств, при наличии у обрабатываемых деталей надежных баз ориентации, устойчивости, отсутствии сцепляемости, симметричности расположения их поверхностей, а также сложности и стоимости ориентирующих и транспортных устройств. На этом уровне оценка технологичности конструкции обрабатываемых деталей выражена комплексным показателем $K_{т.д}$;

- возможность безотказного выполнения соединения с заданным качеством различными исполнительными механизмами и устройствами с учетом их сложности и стоимостных затрат. На этом уровне оценка технологичности конструкции соединения описана комплексным показателем $K_{т.с}$.

Если показатели технологичности детали $K_{т.дi}$ и их соединения $K_{т.сi}$ больше или равны нормативным значениям, при которых автоматические процессы ориентации деталей, их подачи в зону обработки и выполнения установки проходят безотказно с обеспечением требуемого качества, то такая установка может выполняться автоматически;

- структура и состав установочного оборудования с учетом надежности его работы, капитальных затрат и продолжительности цикла установки. На этом уровне технологичность конструкции изделия оценивают комплексным показателем $K_{т.н}$.

Графически методика многоуровневой оценки технологичности конструкции изделия для выполнения автоматического соединения элементов конструкции представлена на рисунке 3.2.

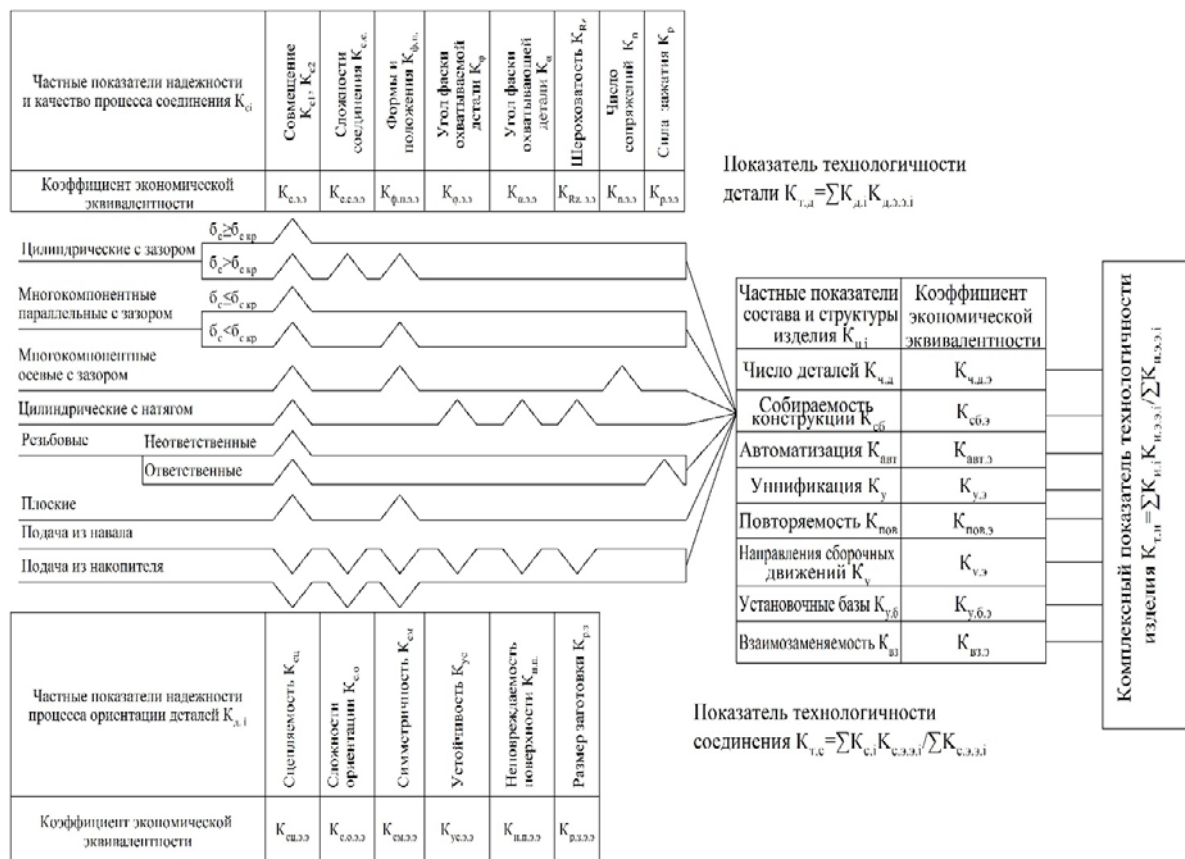


Рисунок 3.2 – Многоуровневая оценка технологичности конструкции изделия

Частные показатели технологичности K_{Ti} рассчитывались на основе данных многолетних теоретических, экспериментальных и производственных исследований процессов автоматической установки различных деталей, а также размеров капиталовложений на создание или приобретение автоматического оборудования, в частности роботов - манипуляторов. Коэффициенты $K_{\Sigma i}$ определялись с учетом влияния каждого частного показателя K_{Ti} на производительность и себестоимость автоматического процесса установки по результатам экспериментальных и производственно-статических исследований и на основании экспертных оценок [79].

Сумма значения всех коэффициентов $K_{\Sigma i}$ должна быть равна 1, это означает, что каждый из коэффициентов $K_{\Sigma i}$ должен быть очень мал.

Частные и комплексный показатели технологичности алмазного долота для условий автоматизированной сборки

Для определения технологичности конструкции алмазного долота воспользуемся методикой [9, 102], которая позволяет оценить конструкцию с помощью частных и комплексных показателей.

Автоматизация сборки деталей является одной из наиболее сложных задач. На автоматическое ориентирование и подачу в зону сборки собираемых деталей влияют габаритные размеры и их соотношение, масса, число и порядок осей симметрии, сложность геометрических форм, материал, качество поверхностей, сохраняемость формы, наличие ориентирующих и захватных поверхностей, неповреждаемость поверхностей.

Присоединяемые детали могут податься из навала при помощи вибрационных бункерно-загрузочных устройств (ВБЗУ) либо магазина – накопителя, в котором присоединяемые детали ориентированы. Основными критериями, определяющими выбор способа загрузки, являются: габаритные размеры деталей, неповреждаемость их поверхностей и сцепляемость.

Сцепляемость деталей характеризуют свободой относительных линейных и угловых перемещений прилегающих друг к другу деталей. Если детали сцепляются вследствие своей формы или в результате наличия каких-либо выступающих элементов, то минимальный угол допустимого поворота для их разделения складывается из суммы двух углов: угла сцепления Θ и угла трения ρ : $\Theta + \rho$.

Рассматривая возможный поворот деталей в пределах от 0 до π , можно рассчитать показатель технологичности - коэффициент сцепляемости:

$$K_{\text{сц}} = 1 - (\Theta + \rho) / \pi,$$

где $\rho = \arctg(f)$, f – коэффициент трения.

Сложность процесса ориентации и конструкция ориентирующего устройства зависят от степени асимметричности ориентирующего элемента детали. Чем меньше отличие элемента ориентирования от основной

поверхности, тем сложнее по конструкции и дороже в изготовлении ориентирующее устройство.

Обычными традиционными средствами - механическими (упоры, вырезы, флажки и т.д.) - ориентацию деталей производят надежно, когда размер ориентирующего элемента (ОЭ) составляет не менее 1,5...2 мм. Для безотказной ориентации деталей с размерами ОЭ менее 1,5...2 мм применяют оптические, оптико-механические, пневматические ориентирующие устройства (зачастую со сложной микропроцессорной системой управления).

Технологичность конструкции с точки зрения удобства ориентации детали и затрат на ориентирующие устройства оценивают частным коэффициентом технологичности - сложности ориентации

$$K_{\infty} = 1 / K_o ,$$

где K_o - коэффициент, учитывающий увеличение стоимости ориентирующих устройств в связи с их усложнением.

Значение K_o и коэффициента K_{∞} находятся в зависимости от размеров ориентирующего элемента [98]

$$\text{Размер ОЭ} = (d_2 - d_1) / 2 ,$$

где d_1 и d_2 – наибольший и наименьший диаметр захватываемой детали. На рис. 3.3 представлена прямая зависимость размера ориентирующего устройства от стоимости.

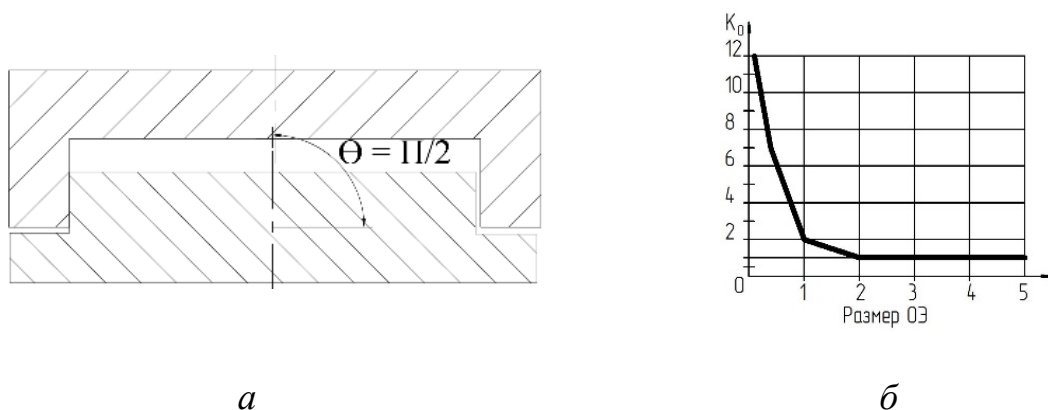


Рисунок 3.3 – Определение частных показателей технологичности: *а* - возможный поворот детали (коэффициент сцепляемости); *б* - влияние размера ОЭ на стоимость ориентирующего устройства (коэффициент ориентации)

Значение K_o и коэффициента K_{co} приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Значение коэффициентов K_o и K_{co}

Размер ОЭ, мм	K_o	K_{co}
Более 5	1	1
2...5	1,1...1,25	0,8...0,9
1...2	1,4...1,7	0,6...0,7
0,3...1	5...7	0,2...0,15
0,3	10...20	0,05...0,1

Частный показатель технологичности K_{yc} характеризует устойчивость деталей, подаваемых в накопителях в зону автоматической сборки. Коэффициент устойчивости зависит от соотношения габаритных размеров подаваемого элемента конструкции и угла наклона детали. Цилиндрические детали могут иметь устойчивое положение либо по торцу, либо по образующей. При соотношении $D/L = 1/10...1/3$ устойчивость цилиндров на торце мала, они практически всегда будут падать на образующую. Детали с соотношением $D/L > 3$ имеют высокую устойчивость. Таким образом, частный коэффициент устойчивости для цилиндрических деталей определяют, как

$$K_{yc} = \frac{\arctg(D/L)}{\pi/4} \text{ при } D/L > 4$$

Вероятность положения детали, подаваемой автоматически загрузочными устройствами, обусловлена числом ее различаемых положений. Все неправильно ориентированные детали должны быть удалены из подающих лотков пассивными ориентирующими устройствами либо переориентированы в нужное положение активными ориентирующими устройствами. Таким образом, от числа ступеней ориентации зависит производительность автоматического загрузочного устройства и число ориентирующих устройств.

Число различных положений детали оценивают частным показателем технологичности – коэффициентом симметричности K_{cm} .

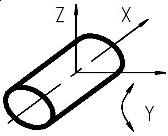
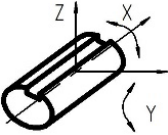
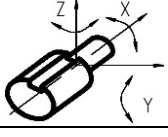
Для цилиндрических деталей:

$$K_{cm} = 1/n_{c.o}$$

где $n_{c.o}$ - число ступеней ориентации.

Числовые значения для цилиндрических деталей приведены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Значения коэффициента $K_{см}$ для цилиндрических деталей

Вид цилиндрической детали	Степень симметрии	$n_{с.о}$	$K_{см}$
	Деталь может занимать два положения. Для ее ориентации достаточно поворота относительно оси Y	1	1
	Для ориентации детали необходимо два поворота: относительно осей X и Y	2	0,5
	Для ориентации детали необходимо три поворота: относительно осей X, Y, Z	3	0,33

Коэффициенты экономической эквивалентности частных показателей технологичности деталей определяют, исходя из влияния этих показателей на производительность автоматических загрузочных устройств при помощи регрессивного анализа, устанавливающего корреляционную зависимость между частными показателями на основе статистических данных.

Коэффициенты экономической эквивалентности, полученные в результате статических исследований автоматических загрузочных устройств на передовых заводах, и нормативные минимальные значения показателей технологичности деталей приведены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Нормативные значения частных показателей технологичности деталей и их коэффициенты экономической эквивалентности

Тип загрузочного устройства	$K_{сц}$	$K_{сц.э.э}$	$K_{со}$	$K_{со.э.э}$	$K_{ус}$	$K_{ус.э.э}$	$K_{см}$	$K_{см.э.э}$
Магазины накопители	0,8	0,4	0,2	0,2	-	-	0,25	0,4

В том случае, если расчетный комплексный коэффициент технологичности детали равен или больше нормативного (минимально допустимого), автоматическую подачу в ориентированном состоянии детали возможно

осуществить с высоким уровнем безотказности и минимальными затратами на изготовление ориентирующих устройств.

Комплексный показатель технологичности конструкции детали с учетом (3.7) находится по следующей формуле:

$$K_{т.д} = \frac{(K_{сц} \cdot K_{сц \text{ э.э}} + K_{со} \cdot K_{со \text{ э.э}} + K_{ус} \cdot K_{ус \text{ э.э}} + K_{см} \cdot K_{см \text{ э.э}})}{K_{сц \text{ э.э}} + K_{со \text{ э.э}} + K_{ус \text{ э.э}} + K_{см \text{ э.э}}}$$

Оценка технологичности конструкции [90] алмазного долота начинается с расчета коэффициента сцепляемости. Зная, что $\Theta = \pi / 2$, $f=0,17$ (сталь по стали, корпус – ниппель (далее К-Н) и $f=0,18$ (твердый сплав по стали, корпус – резец (далее К-Р), сцепляемость элементов сборки равна:

$$\text{К-Р: } K_{сц} = 1 - (\pi / 2 + \arctg 0,18) / \pi = 1 - (1,57 + 0,168) / 3,14 = 0,446.$$

$$\text{К-Н: } K_{сц} = 1 - (\pi / 2 + \arctg 0,17) / \pi = 1 - (1,57 + 0,178) / 3,14 = 0,443.$$

Размер ориентирующего элемента равен половине диаметального размера резца, исходя из этого коэффициент сложности ориентации $K_{со}$ равен 1.

Для соединения К-Р:

$$\text{Размер ОЭ} = (d_2 - d_1) / 2 = 13/2 = 7,5 \Rightarrow K_o = 1 \text{ и } K_{со} = 1$$

Для соединения К-Н:

$$\text{Размер ОЭ} = (d_2 - d_1) / 2 = (180-160)/2 = 10 \Rightarrow K_o = 1 \text{ и } K_{со} = 1$$

Так как резец представляет собой вал, где разница между диаметром и высотой составляет 1 мм, удобнее базировать деталь по торцу (вертикальное положение). Тогда, коэффициент устойчивости будет равен:

$$K_{ус} = \frac{\arctg(13/14)}{\pi / 4} = 0,96,$$

где диаметр резца 13 мм, длина 14 мм.

Для соединения К-Н, коэффициент устойчивости также будет равен 0,96.

Коэффициент симметричности для соединений К-Н и К-Р равен 1, так как детали могут занимать только два положения. Для ее ориентации достаточно поворота относительно оси У.

Исходя из этого, комплексный коэффициент технологичности соединения К-Р с использованием магазина накопителя, с учетом рассчитанных показателей равен

$$K_{\text{т.д.р}} = \frac{(0,446 \cdot 0,4 + 1 \cdot 0,2 + 0,96 \cdot 0 + 1 \cdot 1)}{0,4 + 0,2 + 0 + 0,4} = 1,37$$

Нормативный комплексный коэффициент технологичности алмазного долота с использованием магазина накопителя, по данным таблицы 3.3, равен

$$K_{\text{т.д.н}} = \frac{(0,8 \cdot 0,4 + 0,2 \cdot 0,2 + 0,25 \cdot 0,4)}{0,4 + 0,2 + 0,4} = 0,46$$

Таким образом, расчетный комплексный коэффициент технологичности детали больше нормативного, это доказывает, что автоматическую подачу в ориентированном состоянии детали возможно осуществить с высоким уровнем безотказности и минимальными затратами на изготовление ориентирующих устройств.

Результаты расчета частных и комплексных показателей технологичности приведена в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Результаты расчетов показателей технологичности

Соединение	$K_{\text{сц}}$	$K_{\text{со}}$	$K_{\text{ус}}$	$K_{\text{см}}$	$K_{\text{т.д.р}}$	$K_{\text{т.д.н}}$
Резец – корпус	0,446	1	0,96	1	1,37	0,46
Корпус - ниппель	0,443	1	0,96	1	1,36	

Таким образом, расчетный комплексный коэффициент технологичности детали больше нормативного, это доказывает, что автоматизация процесса сборки конструкции возможна и целесообразна.

При этом автоматизация сборки в базовом варианте исполнения нерациональна и невозможна, так как требует взаимной ориентации большого числа элементов и создания специального сборочного оборудования.

Требования технологичности, предъявляемые к конструкции соединений.
На безотказность автоматической установки сориентированной детали в зону обработки оказывают влияние:

- вид сопряжений (цилиндрические, конические, плоские, резьбовые поверхности и их различные сочетания);

- размеры, их точность, погрешность формы поверхностей заготовки, параметр шероховатости; конструктивные элементы детали; точность расположения установочных поверхностей относительно базовых и т.п.

Особенности собираемых деталей и характер сопряжения определяют выбор автоматического сборочного устройства, его кинематические и динамические характеристики, безотказность работы и качество выполнения соединения.

Условия собираемости цилиндрических соединений с зазором, закономерность протекания автоматического сборочного процесса и выбор исполнительного сборочного механизма зависят прежде всего от диаметрального зазора σ_c . Как показали теоретические и экспериментальные исследования [6, 9], автоматическое выполнение соединений с диаметром D в зависимости от величины относительного диаметрального зазора K можно разделить на три группы. Величину относительного диаметрального зазора рассчитывают по формуле:

$$K = \sigma_c / D \quad (3.8)$$

Особенностью выполнения сборки резьбового соединения (РС) корпус-ниппель является необходимость вращения присоединяемой детали, которое одновременно осуществляет движение автопоиска. Поэтому процесс совмещения осей сопрягаемых поверхностей достаточно надежен, и существующие погрешности положения собираемых деталей могут быть компенсированы за счет нежесткости конструкции исполнительного резьбозавертывающего механизма. Частные коэффициенты технологичности для РС, оценивающие возможность безотказного выполнения этапа наживления резьбовых поверхностей, определяют по следующим формулам:

$$K_{cl} = 1 - \frac{\Delta_{\Sigma}}{\sum_1^2 f_{ci} + \sigma_{cmin} / 2 + \Delta_y} \quad (3.9)$$

где $\delta_{\text{сmin}}$ - минимальный зазор в резьбе; Δ_y - упругие отжатия патрона из-за нежесткости конструкции: шпиндель гайковерта - насадка - патрон.

Значение Δ_y (Е) для существующих конструкций резьбозавертывающих инструментов - пневмо- и электрогайковертов составляют $(0,5 \pm 0,3) \dots (2,4 \pm 1,6)$ мм в зависимости от конструкции гайковерта и размера резьбового соединения.

Для расчета показателя $K_{\text{с1}}$ рекомендуют брать минимальное значение Δ_y , причем за счет упругих отжатий [6] нормативное значение может быть снижено до 0,3...0,4. В том случае, когда суммарный угол α_{Σ} перекося осей сопрягаемых поверхностей будет больше предельного угла перекося $\alpha_{\text{доп}}$, возможно наживление резьбовых деталей через нитку, что недопустимо. Для определения $K_{\text{с2}}$ необходимо воспользоваться следующей формулой:

$$K_{\text{с2}} = 1 - \frac{\alpha_{\Sigma}}{\alpha_{\text{доп}}}, \quad (3.10)$$

где значение $\alpha_{\text{доп}}$ находится:

$$\text{tg } \alpha_{\text{пр}} = \frac{p - T_{\text{дсп}} \text{tg} 30^\circ}{d + d_1 + T_{d_1}} \quad (3.11)$$

Поэтому необходимым требованием технологичности является ограничение допуска на отклонение от перпендикулярности отверстия под резьбу к торцу поверхности. При этом отклонение от прямого угла не должно превышать $(0,3 \dots 0,5) \alpha_{\text{доп}}$ при автоматическом наживлении присоединяемых деталей.

Смещение α_{Σ} сопрягаемых поверхностей уменьшает значение силы затяжки P_3 на 35...40% и увеличивает ее разброс ΔP_3 на 10...20 % в том случае, когда его величина равна или близка по величине максимальному отжатию патрона гайковерта Е. Чем больше неравенство $\alpha_{\Sigma} < E$, тем стабильнее сила затяжки.

Качество выполнения ответственных РС оценивают частным показателем

$$K_p = 1 - \frac{\Delta_{\Sigma}}{E} \quad (3.12)$$

где E - максимально допустимая величина отжатия патрона резьбозавертывающего инструмента.

Поскольку для сборки ответственных резьбовых соединений гайковерт должен быть оснащен устройством для контроля качества их выполнения (комбинированные методы) с микропроцессорной системой управления, что удорожает стоимость гайковерта в 5...6 раз, необходимо рассчитать показатель технологичности $K_{с.с}$ – сложности соединения.

Нормативные показатели технологичности резьбовых соединений и коэффициенты их экономической эквивалентности будут равны:

Для ответственных РС:

$$\begin{array}{llll} K_{с1н} = 0,3; & K_{с1э.э} = 0,3; & K_{с2н} = 0,5; & K_{с2э.э} = 0,3 \\ K_{р.н} = 0,57 & K_{р.э.э} = 0,3 & K_{с.с.н} = 0,25 & K_{с.с.э.э} = 0,1 \end{array}$$

Для неответственных РС:

$$K_{с1н} = 0,3; \quad K_{с1э.э} = 0,5; \quad K_{с2н} = 0,3; \quad K_{с2э.э} = 0,5.$$

В случае, если резьбовое соединения выполняют по двум или нескольким различным поверхностям, то частные показатели технологичности рассчитывают для каждого вида поверхностей. По частным показателям можно рассчитать комплексный показатель $K_{т.с}$, по формуле

$$K_{т.с} = \frac{\sum_{i=1}^n K_{тi} K_{тiэ.э}}{\sum_{i=1}^n K_{тiэ.э}} \quad (3.13)$$

Нормативное значение $K_{т.с}$ для ответственных РС равно 0,436; для неответственных РС – 0,3.

Если комплексные показатели технологичности соединения $K_{т.с i}$ и образующих его деталей $K_{т.д i}$ будут больше или равны нормативным (минимально допустимым) значениям этих показателей, данное соединение пригодно для автоматического выполнения. Если $K_{т.с i}$ и $K_{т.д i}$ будут меньше нормативных значений этих показателей, то конструкция элементов изделия

нуждается в доработке, в противном случае уровень автоматизации сборки снизится.

После определения показателей $K_{т.с i}$ и $K_{т.д i}$ для всех соединений и деталей рассматриваемого узла или изделия можно рассчитать коэффициент автоматизации сборки

$$K_{авт} = N_{с.авт} / N_c \quad (3.14)$$

где $N_{с.авт}$ - число соединений, выполнение которых можно осуществить автоматически на всех этапах сборочного процесса; N_c - общее число соединений в изделии.

На повышение безотказности, а, следовательно, производительности автоматизации процесса, уменьшение капитальных затрат на создание автоматизированного сборочного оборудования, сокращение сборочного цикла и снижение себестоимости сборки влияет прежде всего число деталей в изделии или сборочной единице. При большем числе деталей n , входящих в изделие, автоматизированная сборочная линия получается сложной, многопозиционной и, как следствие этого, малонадежной в работе.

Если число наименований деталей Q равно числу деталей n или при $Q < n$ все соединения выполняют последовательно, то число сборочных позиций, выполняющих соединения, $n_{сб.п} = n - 1$.

Если при $Q < n$ ряд однотипных соединений выполняют параллельно на одной или нескольких сборочных позициях, то число сборочных позиций

$$n_{сб.п} = \sum_{i=1}^Q g_i m_i - 1 \quad (3.15)$$

где g - наименование i -й детали; m - число сборочных позиций, на которых выполняют соединение с деталями j наименования; Q - число наименований деталей в изделии.

В общем случае, как правило, число позиций больше, так как имеются позиции загрузки и выгрузки, контрольные позиции и т.п.

Автоматизированную сборку изделий можно рассматривать как сложную технологическую систему, надежность которой зависит от надежности ее

элементов (сборочных позиций, сборочный роботов, ориентирующих, транспортных устройств) и оценивается их коэффициентами готовности K_r .

Вероятность P_c того, что система окажется в работоспособном состоянии в произвольный момент времени, рассматривают как произведение вероятностей P_i ее элементов

$$P_c = P_1 P_2 \dots P_n \quad (3.16)$$

При нормальной работе сборочной позиции ее коэффициент готовности $K_r = 0,98 \dots 0,99$. Следовательно, у синхронной сборочной линии или автомата вероятность ее работоспособности составляет $P_c = 0,97 \dots 0,85$ при числе позиций $n_{сб.п} = 2 \dots 8$ и $P_c = 0,67 \dots 0,61$ при $n_{сб.п} = 25 \dots 30$.

При допущении, что число сборочных позиций $n_{сб.п}$ примерно равно числу деталей (ЧД) в изделии или числу наименований Q деталей в изделии, значения частного показателя $K_{ч.д}$, оценивающего влияния числа деталей на состав и надежность работы синхронных линий и автоматов (см. табл. 3.5).

Таблица 3.5 - Зависимость числа деталей на состав и надежность работы синхронных линий

Q, шт	2...4	5...8	9...12	13...16	17...24	25...32	33...48
$K_{ч.д}$	1	0,9	0,85	0,8	0,7	0,65	0,5

При автоматической сборке, выполняемой на РТСК, уменьшение числа деталей в изделии ведет к сокращению времени цикла, количества схватов, сборочного оборудования. Таким образом, одним из главных направлений отработки конструкции изделия на технологичность является ее упрощение за счет сокращения числа деталей, замене трудновыполнимых для автоматической сборки соединений более простыми, при сохранении эксплуатационных характеристик и технологических параметров изделия.

При числе деталей, равном 4...8, нецелесообразно расчленять изделие на сборочные единицы, так как в большинстве случаев легче автоматизировать процесс сопряжения отдельных деталей [6]. При числе деталей $n > 8$ желательно,

чтобы изделие состояло из сборочных единиц, сборку которых можно вести параллельно на отдельных участках, сборочных автоматах или РТК.

Наличие сборочных единиц в изделии оценивают в соответствии с ГОСТ 14.201-83 коэффициентом сборности

$$K_{сб} = \frac{E}{E + D} \quad (3.17)$$

где E - число сборочных единиц в изделии; D - число деталей в изделии, не вошедших в сборочные единицы.

Уровень автоматизации сборки изделия оценивают коэффициентом автоматизации $K_{авт}$, определяемым по формуле: $K_{авт} = N_{с.авт} / N_{с}$. Согласно экспертным оценкам принято, что значения коэффициента автоматизации $K_{авт} < 0,45$ соответствуют низкому; $0,45 \leq K_{авт} \leq 0,6$ -среднему и $K_{авт} > 0,6$ - высокому уровню автоматизации.

Структура автоматической линии, число позиций, комплект оснастки РТСК, их габариты и производительность зависят от числа направлений сборочных движений V_i , которое должно быть минимальным. Наилучшим для условий автоматической сборки является вертикальное движение сверху вниз V_1 . Трудно осуществить сборочные движения, направленные снизу - вверх V_3 , а также к боковым поверхностям собираемого изделия в направлении транспортирования V_2, V_4, V_5, V_6 .

Влияние числа направлений сборочных движений на технологичность сборочного робота при сборке изделий оценивают частным показателем:

$$K_v = \frac{1}{\sum_{i=1}^p V_i} \quad (3.18)$$

где p - число направлений сборочных движений; V_i - сборочное движение в одном направлении.

Горизонтальное направление сборочного движения неприемлемо для большинства сборочных роботов.

Если автоматический сборочный процесс осуществляется роботом на роботизированном сборочном комплексе, то собираемое изделие при $\sum_{i=1}^p V_i > 1$, как правило, приходится кантовать, ибо сборка в горизонтальном и угловом положении накладывает дополнительные требования к точности положения собираемых деталей и к точности позиционирования робота.

Если в автоматизированной сборочной линии требуется дополнительная позиция - кантователь, то ее стоимость возрастает, так как стоимость кантователя составляет 20...40 % от стоимости однопозиционной сборочной позиции. При использовании сборочного робота каждое кантование собираемого изделия приводит не только к повышению стоимости сборки, так как обычно требуются новые приспособления, но и к удлинению цикла сборки на время

$$t_s = (t_{cx} + t_{кан} + t_{yc} + t_{\phi}) \left(\sum_{i=1}^p V_i - 1 \right) \quad (3.19)$$

где t_{cx} - время на разжим и зажим схвата при кантовании; $t_{кан}$ - время кантования собираемого изделия; t_{yc} - время установки собираемого изделия в сборочное приспособление; t_{ϕ} - время фиксации собираемого изделия в приспособления.

Крайне нежелательной для автоматического сборочного процесса является смена установочных баз собираемого изделия, так как она требует обязательного кантования, что помимо дополнительной позиции в сборочной линии и удлинения цикла сборки выполняемой роботом, ведет зачастую к созданию новых приспособлений, т.е. к увлечению затрат и снижению точности сборки.

Это предъявляет к конструкции изделия дополнительное требование - создание различных идентичных установочных баз, не требующих новых приспособлений при их смене. Либо новые базы должны быть аналогичными, что позволяет создать более сложное групповое сборочное приспособление.

При синхронной конвейерной сборке на палетах новые установочные базы-изделия требуют расчленения сборочной линии на ряд участков со своей транспортной и приводной системами и соответственно увеличения числа палет.

Рост стоимостных затрат оценивают частным показателем, учитывающим число и сложность установочных баз

$$n_{y.б} = 1 / mn_{y.б} \quad (3.20)$$

где $n_{y.б}$ - число установочных баз собираемого изделия; m - коэффициент, оценивающий увеличение затрат на изготовление сборочных приспособлений различного типа и транспортной системы. Коэффициент m будет равен:

- если установочные базы изделия одинаковые, то $m = 1$;
- если установочные базы изделия аналогичные, то $m = 1,15$;
- если установочные базы изделия различные, то $m = 2,5$.

Число автоматических сборочных позиций, их конструктивное исполнение и сложность зависят от унификации составных частей изделия и оценивают коэффициентом повторяемости

$$K_{пов} = 1 - Q_{с.авт} / N_{с.авт} \quad (3.21)$$

где $Q_{с.авт}$ - число наименований соединений, которые выполняются автоматически; $N_{с.авт}$ - общее число соединений, выполняемых автоматически.

Если речь идет о независимых соединениях одного типоразмера, которые можно выполнять в любой последовательности или одновременно, то этот коэффициент характеризует возможность применения многошпиндельных сборочных автоматических позиций для собираемых деталей одинаковых размеров. При этом количество многошпиндельных автоматов одноцелевого назначения будет зависеть от рационального расположения этих соединений в изделии, т.е. расстояния l , которое должно быть равно или больше минимального расстояния между осями исполнительных устройств сборочной позиции.

Если учесть, что стоимость многошпиндельной сборочной позиции больше стоимости одношпиндельной примерно в 2...2,5 раза, то капитальные затраты при выполнении таких соединений одного типоразмера сократятся в $q_i / (2...2,5)$, где q_i - число соединений одного типоразмера.

Если собираемое изделие имеет повторяющиеся зависимые соединения, выполняемые раздельно во времени (т.е. между ними устанавливают другие детали), то коэффициент повторяемости оценивает число одинаковых позиций в

линии. Затраты на изготовление таких сборочных позиций уменьшаются, так как расходы на проектирование и подготовку производства таких сборочных позиций сокращаются в q_i раз.

В РТСК коэффициент повторяемости характеризует сокращение числа захватных устройств исполнительных механизмов, номенклатуру подающих устройств, и время на их смену.

Коэффициент повторяемости для группы изделий, собираемых на РТСК, оценивает также сокращение подготовительно-заключительного времени $T_{п.з}$ на переналадку РТК при переходе на сборку изделия другого типоразмера

$$T_{п.з} = \left[\sum_{i=1}^R \left(T_{п.з.i} \frac{N_i}{n_i} \right) \right] (1 - K_{пов}) \quad (3.22)$$

где R - число типоразмеров собираемых изделий на РТК; $T_{п.з.i}$ - подготовительно-заключительное время для сборки изделия i -го типоразмера; N_i и n_i - размер соответственно программного задания и партии изделий i -го типоразмера.

Размеры капитальных затрат на создание автоматического сборочного оборудования, а, следовательно, и себестоимость автоматической сборки, оценивают также частным показателем - коэффициентом унификации K_y в отличие от соответствующего показателя по ГОСТ 14.201-83, равным

$$K_y = N_{у.с.авт} / N_{с.авт} \quad (3.23)$$

где $N_{у.с.авт}$ - число соединений, выполняемых на унифицированном автоматическом (типовом) сборочном оборудовании; $N_{с.авт}$ - общее число соединений, выполняемых автоматически.

По данным организаций-разработчиков сборочного автоматического оборудования затраты на создание не имеющего аналогов сборочного оборудования возрастают в 1,8...2 раза по сравнению со стоимостью типового сборочного оборудования. Затраты на проектирование сборочного оборудования по имеющимся типовым аналогичным конструкциям возрастают на 10...30 %.

При автоматическом выполнении сборки изделия и его составных частей необходимо, чтобы точность замыкающего звена размерной цепи

обеспечивалась методом полной взаимозаменяемости. Выполнение пригоночных работ, как правило, недопустимо. Проведение регулировочных работ, разборок, повторных сборок требует наличия ручных операций, что снижает уровень автоматизации сборки [14].

Соединения, выполняемые методом групповой взаимозаменяемости (селективная сборка), автоматически осуществлять возможно, но с увеличением капитальных затрат примерно на 15 %, так как требуется 100 % контроль сопрягаемых поверхностей собираемых деталей и разделение их на необходимое число групп. На автоматической линии необходимо встраивать автомат для контроля сопрягаемых поверхностей базовых или собираемых изделий, а на сборочной позиции устанавливать для присоединяемых деталей дополнительные вибробункеры или другие автоматически подающие устройства с системой адресования [30].

Технологичность конструкции изделия в данном случае оценивают частным показателем коэффициентом взаимозаменяемости

$$K_{вз} = 1 - \frac{N_{с.гр.авт}}{N_{с.авт}} \quad (3.24)$$

где $N_{с.гр.авт}$ - число соединений, выполняемых автоматически методом групповой взаимозаменяемости.

На основании экспертных оценок и экономических расчетов были определены значения коэффициентов экономической эквивалентности рассмотренных ранее дополнительных частных показателей технологичности:

$$\begin{aligned} K_{авт} &= 0,3; & K_{ч.д} &= 0,27; & K_{пов} &= 0,1; & K_y &= 0,12 \\ K_{у.б} &= 0,1; & K_{сб} &= 0,003; & K_{вз} &= 0,003; & K_v &= 0,005 \end{aligned}$$

Определение частных показателей технологичности изделия позволяет рассчитать комплексный показатель технологичности изделия, оценивающий уровень его пригодности к автоматической сборке, по формуле

$$K_{т.н} = \frac{\sum_i^n K_{т.н.i} K_{т.н.i.э.э}}{\sum_i^n K_{т.н.i.э.э}} = (K_{ч.д.i} K_{ч.д.i.э.э} + K_{авт.i} K_{авт.i.э.э} + K_{у.i} K_{у.i.э.э} + K_{уб.i} K_{уб.i.э.э} +$$

$$K_{ун.i} K_{ун.i.э.э} + K_{вз.i} K_{вз.i.э.э} + K_{сб.i} K_{сб.i.э.э} + K_{в.i} K_{в.i.э.э}) / (K_{ч.д.i.э.э} + K_{авт.i.э.э} + K_{у.i.э.э} + K_{уб.i.э.э} + K_{ун.i.э.э} + K_{вз.i.э.э} + K_{сб.i.э.э} + K_{в.i.э.э})$$

Причем при $K_{ч.д}$ в интервале 0,9...1 (число деталей - 8) коэффициент сборки не учитывается. Было принято, что при значениях комплексного показателя $K_{т.н} > 0,6$ конструкцию изделия можно считать технологичной для автоматической сборки. При меньших значениях $K_{т.н}$ конструкция изделия нуждается в доработке.

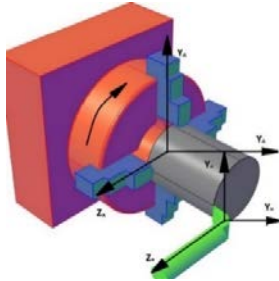
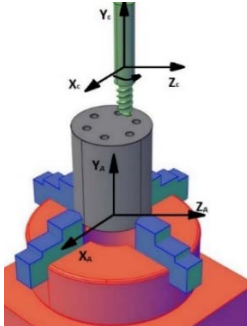
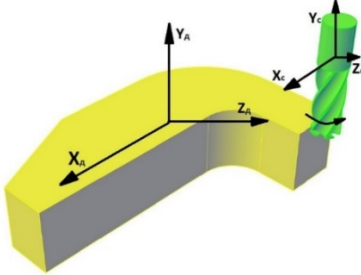
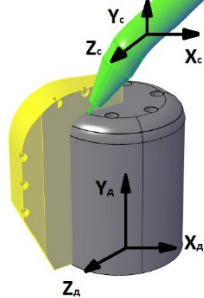
3.4 Совершенствование технологического маршрута изготовления алмазного долота с применением высокопроизводительного оборудования

Рассматривая допуск на наружный диаметр долота как погрешность изготовления, следует заметить, что эта погрешность формируется на протяжении всего технологического цикла изготовления инструмента, и представляет собой сумму погрешностей, формируемых при механической обработке базовых и исполнительных поверхностей корпуса долота, а также погрешности приваривания лопастей к корпусу, погрешности установки резцов в отверстия лопастей при пайке и погрешность установки корпуса в ниппель. Соответственно, достижение заданных стандартом значений допусков при сборке долота приводит к необходимости назначения достаточно жестких допусков на этапах механической обработке, и промежуточных стадиях сборки соединений. Учитывая, значительное число слесарно-сборочных операций, выполняемых вручную, имеет место большой объем регулировочных работ для выверки относительного положения присоединяемых элементов, влияние человеческого фактора на стабильность получаемых параметров точности долота и колоссальные затраты времени на технологические операции.

Проанализировав [92, 93] был смоделирован базовый технологический маршрут изготовления корпуса алмазного долота с применением

универсального оборудования и трёхкоординатных станков, основные операции которого приведены в табл. 3.6.

Таблица 3.6 - Базовый технологический маршрут изготовления корпуса

Операция 005 – Токарная с переустановом 	Операция 010 – Сверлильная с ЧПУ 
Операция 015 – Фрезерная с ЧПУ Фрезерование лопастей долота 	Операция 020 –Сварочная Приварка лопастей к корпусу 

Соответственно, конструкцию долота в базовом варианте можно признать нетехнологичной в связи с наличием значительного числа операций и переустановов, на каждом из которых формируется погрешность установки. Очевидно, что конструкция инструмента требует доработки и усовершенствования.

На размерную точность долота влияют погрешности ω_i , проявляемые на всех промежуточных этапах технологического процесса изготовления инструмента – погрешности механической обработки базовых поверхностей корпуса – торца и резьбового отверстия, погрешности обработки отверстий под резцы, погрешности, проявляемые при пайке, резцов, погрешности от упрочняющей наплавки, погрешности изготовления ниппеля. Сумма погрешностей должна быть меньше или равна допуску на диаметр. Выполнить данное требование при реализации базовой технологии изготовления долота

невозможно без применения большого объема пригоночных работ. В связи с этим представлялся целесообразным совершенствование базовой технологии изготовления в части механической обработки корпуса и методов сборки с целью обеспечения требуемых параметров точности долота и снижения трудоемкости изготовления, благодаря использованию современного оборудования с числовым программным управлением (ЧПУ) и замены сборной конструкции корпуса на цельнометаллическую. Модернизированный маршрут для условий многономенклатурного автоматизированного производства представлен в таблице 3.7

Таблица 3.7 - Модернизированный технологический маршрут изготовления корпуса.

№ п/п	Наименование операции	Базирование	Оборудование
005	Заготовительная Кузнечнопрессовая (получение поковки)	-	КГШП Печь термическая Подкладной штампы
010	Термическая Нормализованной отжиг	В вертикальном положении	Печь термическая
015	Термическая Улучшение	-	Печи термические
020	Контрольная Контроль твердости		Дефектоскоп ультразвуковой, Твердомер Роквелла
025	Токарная с ЧПУ (с перезахватом) Черновая и чистовая обработка торцевых поверхностей, наружной цилиндрической поверхности, внутреннего ступенчатого глухого отверстия, фасок, нарезание внутренней резьбы под ниппель. Автоматизированный контроль параметров точности	В самоцентрирующемся трехкулачковом патроне По торцу и наружной цилиндрической поверхности (с использованием двойной опорной базы)	Токарный станок с ЧПУ с противошпинделем
030	Слесарная Притупление острых кромок		Слесарный верстак
035	Фрезерная с ЧПУ пятикоординатная (многопозиционная)	На резьбовой оправке. По торцу и внутренней цилиндрической поверхности	Фрезерный станок с ЧПУ Поворотно- наклонный стол.

Продолжение таблицы 3.7

	Контурная обработка фрезерованием наружной поверхности, формообразование лопастей, сверление промывочных отверстий, фрезерование лунок по резцы. Автоматизированный контроль параметров точности		
040	Слесарная Притупление острых кромок		
045	Сборочная Пайка резцов индукционной пайкой	На резьбовой оправке. По торцу и внутренней цилиндрической поверхности	Индуктор ТВЧ, ориентирующее устройство.
050	Упрочняющая Электроискровое упрочнение лопастей корпуса твердым сплавом	На резьбовой оправке. По торцу и внутренней цилиндрической поверхности	Оборудование для ЭИУ
055	Газотермическая Плазменное напыление на корпус износостойкого покрытия на основе твердого сплава	На резьбовой оправке. По торцу и внутренней цилиндрической поверхности	Установка для плазменного напыления
060	Сборочная Сборка корпуса и ниппеля	По базовому торцу корпуса и резьбе	Автоматизированное сборочное оборудование
065	Слесарная Разделка кромок корпуса и ниппеля	На оправке по основным базам ниппеля	Слесарный верстак, шлифмашинка
070	Сварочная Сварка корпуса и ниппеля	На оправке по основным базам ниппеля	Сварочный аппарат
075	Контрольная сортировочная	На оправке по основным базам ниппеля	Стол контролера ОТК

Для обработки сложнопрофильного корпуса рекомендуется современные высокопроизводительные четырех- и пятиосевые станки, и обрабатывающие центры (ОЦ) с ЧПУ [32].

Цельнометаллический корпус позволяет исключить сварку лопастей и повысить размерную точность поверхностей под резцы и равную их ориентацию относительно торца корпуса и его оси. Выполнение всех отверстий с одного установка снижает погрешность установки до минимального значения, так как

предложенная схема базирования заготовки на токарном и фрезерном станках позволяет реализовать важнейшие принципы единства и постоянства баз.

Рассмотрены позиционные связи оборудования анализ которых позволяет минимизировать погрешности установки при выполнении механообработки. Координатные системы станка, детали и инструмента представлены на рис. 3.4.

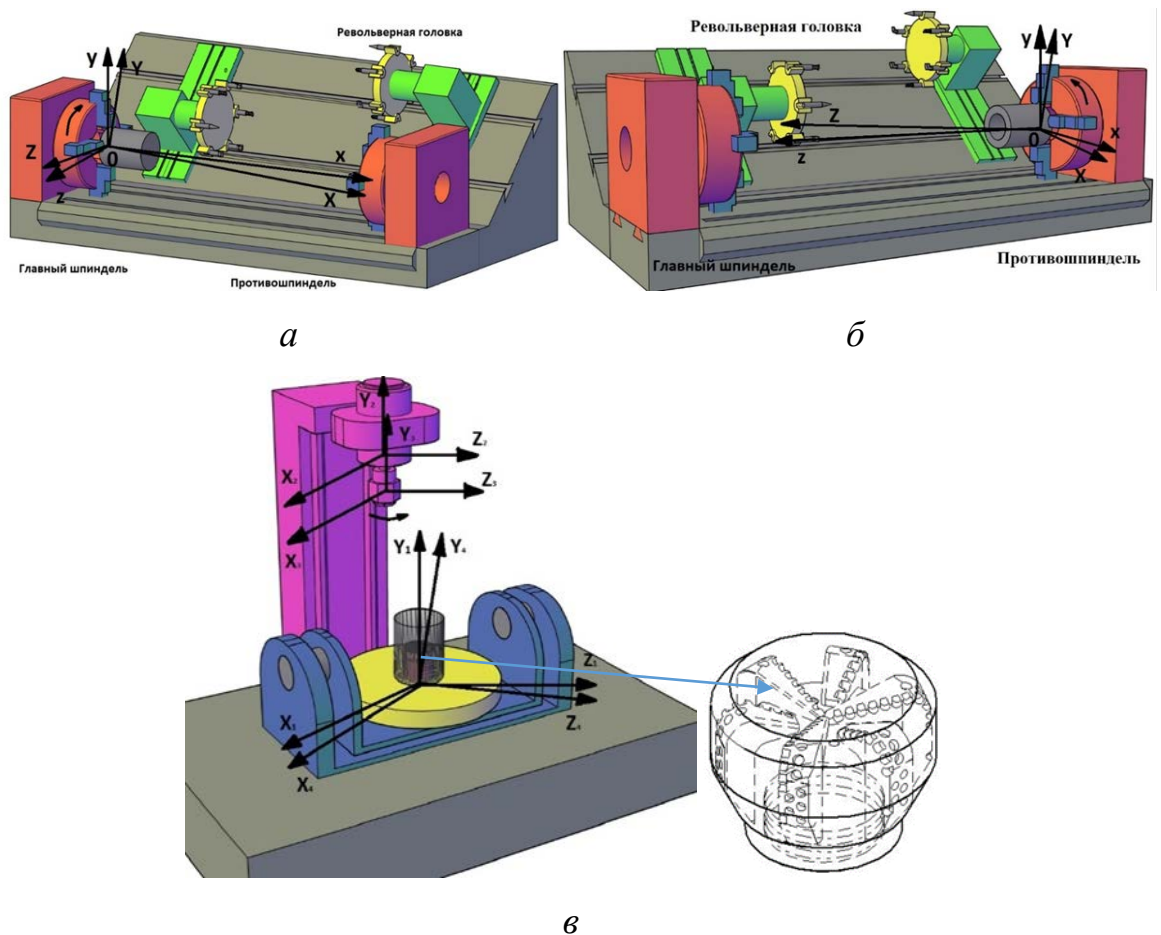


Рисунок 3.4. - Координатные системы станка, детали и инструмента: а – установ А токарной операции (главный шпиндель); б – установ Б токарной операции (противошпиндель); в – фрезерная операция на специальной резьбовой оправке

Проектирование технологических процессов механообработки основывается на реализации следующих принципов:

- принцип малооперационной технологии, который заключается в формировании техпроцесса с максимально возможным укрупнением операций,

с максимальным числом переходов при минимизации количества установов в операции;

- принцип «безотладочной» технологии заключающийся в разработке технологических процессов, не требующих дополнительных отладок на рабочих позициях, что особенно актуально для широкономенклатурных производств, поскольку значительно сокращает подготовительно-заключительное время [10].

Одним из наиболее трудоемких процессов при изготовлении корпуса является обработка глухих отверстий под резцы. При использовании пятикоординатного станка эта задача значительно упрощается за счет применения стандартных циклов обработки отверстий сверлением и фрезерованием. На рис. 3.5 представлена схема постоянного цикла сверления группы отверстий в корпусе. Шесть программируемых отверстий, каждое из которых определяется соответствующей опорной точкой **P**, расположены на одинаковом расстоянии от центра **C** долота, что формирует позиционную точность осей отверстий под резцы и промывочные каналы. При этом возможно обрабатывать как сквозные, так и глухие отверстия при помощи концевых фрез требуемого диаметра. В системе ЧПУ типа ECS 2101 (CNC) приведенный постоянный цикл определяется двумя подготовительными функциями **G93** и **G81**, а формат записи цикла имеет вид [65, 80, 97]:

N50 G93 G81 G02 (X...Y...)P (I... J...)C HB6 E...R...RA.....,

где (X...Y...)P – координаты первого обрабатываемого отверстия;

RA – координата исходной точки;

R – координата точки врезания;

E – координата конечной точки;

HB6 – задаваемое число обрабатываемых отверстий, количество которых может составлять от 1 до 99.

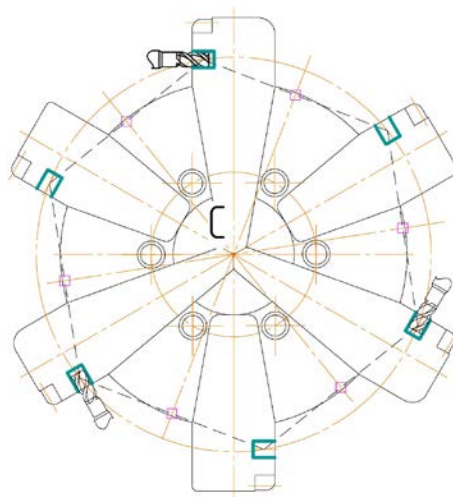


Рисунок 3.5 - Схема постоянного цикла сверления группы отверстий в корпусе долота (вид сверху на плоскость X0Y)

Сверление отверстий в корпусе, расположенных под различными углами по отношению к оси, можно также выполнять, представляя координаты центров программируемых отверстий в виде прямоугольной сетки с определенным числом отверстий в лопастях, расположенных на двух сторонах прямоугольника. Здесь сетка отверстий может быть развернута в системе координат детали под различным углом (рис. 3.6).

В этом случае приведенный постоянный цикл определяется двумя подготовительными функциями G92 и G81. Формат записи цикла имеет вид:

$$N5 G92 G81 G02 (X...Y...)_P (I... J...) (IA... JA...)$$

$$HA...HB... E...R...(RA.....),$$

где $(X...Y...)_P$ – координаты первого обрабатываемого отверстия;

$(I... J...)$ – разность координат центров двух смежных отверстий;

$(IA... JA...)$ – разность координат центров двух крайних отверстий, расположенных в смежных рядах;

$HA...$ и $HB....$ – количество отверстий, расположенных на соответствующей стороне прямоугольной сетки;

$(RA.....) R... E...$ – координаты соответственно исходной точки, точки врезания и конечной точки сверления [66].

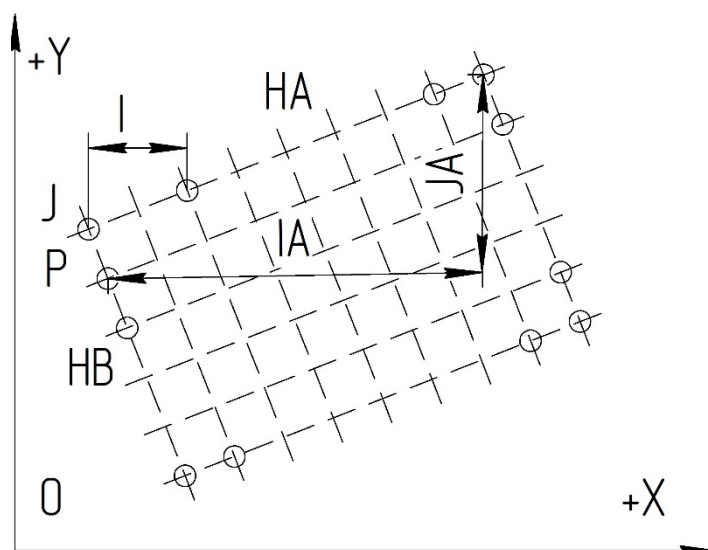


Рисунок 3.6 - Схема постоянного цикла сверления сетки отверстий:

Обработку корпуса долота возможно осуществлять на любом доступном по стоимости пятикоординатном обрабатывающем (ОЦ) центре с ЧПУ. Достаточно широкими технологическими возможностями в условиях многономенклатурного производства имеет ОЦ Mikron НЕМ 500U (рис. 3.7). Его отличительными характеристиками являются гибкость, компактность, простой дизайн и удобство в использовании. Данный станок подходит для обработки деталей в таких областях, как аэрокосмическая, автомобильная промышленность и общее машиностроение. Высокопроизводительные мотор – шпиндели, рисунок 1.7.2, поворотный - наклонный стол, рисунок 1.7.3, стабильный и жесткий корпус станка создают наилучшие условия для экономичной и прецизионной обработки современными инструментами. Станок рассчитан на применение в автоматизированном производстве. В Mikron НЕМ 500U реализован хороший обзор процесса обработки, простая загрузка и легкий доступ к обрабатываемой детали. Это функциональное и простое решение для фрезерования обеспечивается благодаря системе управления Heidenhain ITNC 530, позволяющей с большой точностью обрабатывать контур заготовки на высокой скорости. Единообразная цифровая концепция системы управления обеспечивает высокую точность и качество поверхности, а также высокие скорости перемещений.

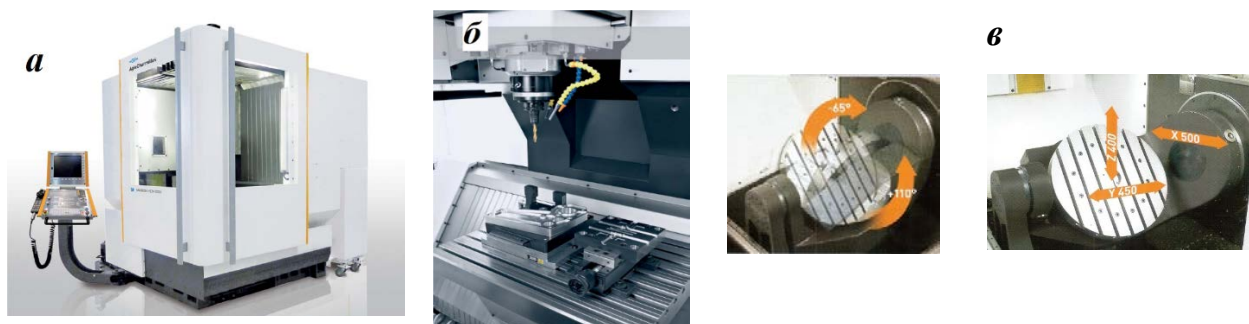


Рисунок 3.7 – Обрабатывающий центр с ЧПУ Mikron NEM 500U: а – общий вид; б - встроенный шпиндель; в - поворотно – наклонный стол с параллельными пазами

Был подобран роботизированный манипулятор с цифровым зрением QJR20-1600 как для установки заготовки на обрабатывающий центр, так и для сборки соединений корпус – ниппель, корпус – резец. Робот обладает высокой скоростью работы, высокой точностью повторения позиционирования, подходит для укладки перемещаемых элементов в зону обработки, так и в зону погрузки и разгрузки; обладает возможностью лазерной резки, полировки и другое.

Размах руки составляет 1668 мм, полезная нагрузка – 20 кг, точность повторного позиционирования $\pm 0,05$ мм.

Возможность цифрового зрения позволяет сменить человека в действиях сортировки и отбраковки деталей. Изъяв «человеческий фактор», гарантируется значительное усовершенствование качества продукта, увеличение производительности и сокращение брака.

На станке имеется встроенная система автоматизированного контроля отверстий, осуществляемая с помощью инфракрасного датчика или лазерной головки. Тем самым существенно упрощается контроль точности отверстий и их расположение на лопастях, а также состояние режущих инструментов, что практически исключает появление брака.

Трудоемкость механообработки корпуса по модернизированному маршруту, рассчитанная по укрупнённым нормам [60, 61, 89], снизилась на 28..32% по сравнению с трудоемкостью базовой механообработки.

3.5 Математическое описание формирования позиционной точности обрабатываемых поверхностей корпуса в координатной системе станков

Для установки заготовки в процессе выполнения фрезерной операции предложена резьбовая оправка, идентичная по конструкции ниппелю. Таким образом, при выполнении комплексной обработки как наружной поверхности лопастей, так и цилиндрических углублений под алмазные резцы полностью были реализованы принципы единства и постоянства баз. Благодаря этому, погрешность установки была сведена к минимуму.

Для обеспечения точного позиционирования заготовки относительно установочных элементов приспособления на фрезерном станке на первом этапе расчета были определены нормальные и плановые координаты сопрягаемых поверхностей заготовки и элементов оснастки, а также выявлены пространственные размерные связи.

Нормальные координаты - это отклонения от перпендикулярности точек соединения в направлении к базирующим поверхностям. В нашем случае получается: установочные нормальные координаты – $\Delta z_1, \Delta z_2, \Delta z_3$; координаты двойной опорной – $\Delta x_4, \Delta y_5$ и скрытая координата опорной базы – Δx_6 . Последовательное группирование нормальных координат позволяет выявить матрицу T , определяющую общую погрешность установки ниппеля в корпус долота.

Матрица нормальных координат двойной опорной схемы базирования будет выглядеть следующим образом:

$$T = (\Delta z_1, \Delta z_2, \Delta z_3, \Delta x_4, \Delta y_5, \Delta x_6) \quad (3.25)$$

Погрешность установки корпуса с учетом вектора ω_y :

$$\omega_y = Q \cdot T \quad (3.26)$$

где Q – матрица налагаемых связей, состоящая из плановых координат, находится:

$$Q = \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 & q_{14} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & q_{25} & 0 \\ q_{31} & q_{32} & q_{33} & 0 & 0 & 0 \\ q_{41} & q_{42} & q_{43} & 0 & 0 & 0 \\ q_{51} & q_{52} & q_{53} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & q_{66} \end{vmatrix} \quad (3.27)$$

Элементы $q_{31} \dots q_{53}$ напрямую относятся к установочной базе и определяются:

$$\begin{aligned} q_{31} &= (x_2 y_2 - x_3 y_2) / C & q_{32} &= (x_3 y_1 - x_1 y_3) / C & q_{33} &= (x_1 y_2 - x_2 y_1) / C \\ q_{41} &= (x_3 - x_2) / C & q_{42} &= (x_1 - x_3) / C & q_{43} &= (x_2 - x_1) / C \\ q_{51} &= (y_3 - y_2) / C & q_{52} &= (y_1 - y_3) / C & q_{53} &= (y_2 - y_1) / C \end{aligned}$$

$$\text{где } C = \begin{vmatrix} 1 & y_1 & -x_1 \\ 1 & y_2 & -x_2 \\ 1 & y_3 & -x_3 \end{vmatrix}.$$

Элементы q_{14} , q_{25} , q_{66} относятся к двойной опорной и опорной плоскостям, которые обеспечивают точность углового положения и соответственно равны:

$$- q_{14} = q_{25} = 1$$

- $q_{66} = 1/L$, где L — размер среднего диаметра отверстия корпуса равный 159,395 мм.

Координаты опорных точек x_i , y_i , z_i являются случайными величинами. Для расчета использовались координаты точек, изображенные на рис. 3.8.

Таким образом, предложена методика оценки точности относительного положения исполнительных поверхностей корпуса долота при помощи моделирования позиционных связей, возникающих на этапах комплексной механической обработки корпуса и обоснованы параметры его геометрической точности.

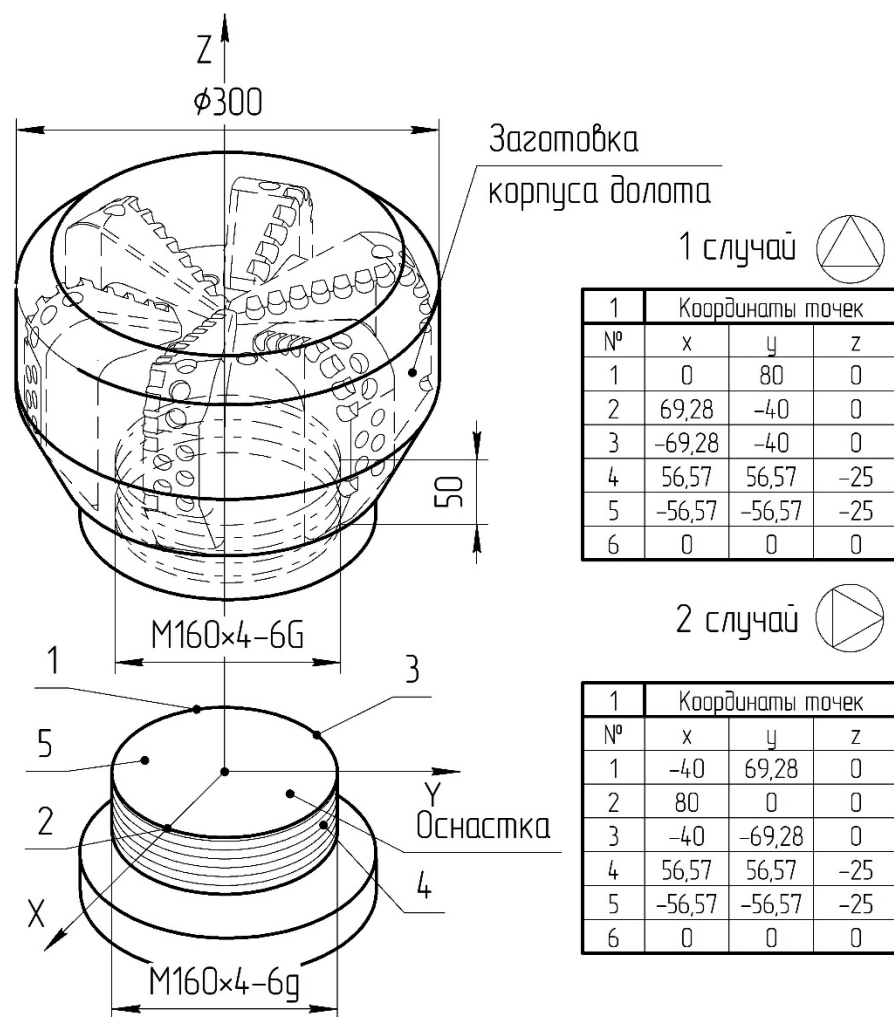


Рисунок 3.8 – Координаты точек базирования

По координатам базовых точек рассчитаем элементы q :

1 случай

$$q_{31} = (69,28 \cdot (-40) - (-69,28) \cdot (-40)) / (-16627,2) = 0$$

$$q_{32} = (-69,28 \cdot 80 - 0 \cdot (-40)) / (-16627,2) = 0,333$$

$$q_{33} = (0 \cdot (-40) - 69,28 \cdot 80) / (-16627,2) = -0,333$$

$$q_{41} = (-69,28 - 69,28) / (-16627,2) = 0,008$$

$$q_{42} = (0 - (-69,28)) / (-16627,2) = -0,004$$

$$q_{43} = (69,28 - 0) / (-16627,2) = -0,004$$

$$q_{51} = (-40 - (-40)) / (-16627,2) = 0$$

$$q_{52} = (80 - (-40)) / (-16627,2) = -0,007$$

$$q_{53} = (-40 - 80) / (-16627,2) = 0,007$$

$$q_{53} = 1 / 159,395 = 0,006$$

$$C = \begin{vmatrix} 1 & 80 & 0 \\ 1 & -40 & -69,28 \\ 1 & -40 & 69,28 \end{vmatrix} = -16627,2$$

2 случай

$$q_{31} = (80 \cdot 0 - (-40) \cdot 0) / (-13856) = 0$$

$$q_{32} = (-40 \cdot 69,28 - (-40) \cdot (-69,28)) / (-13856) = 0$$

$$q_{33} = (-40 \cdot 0 - 80 \cdot 69,28) / (-13856) = -0,4$$

$$q_{41} = (-69,28 - 69,28) / (-13856) = 0,009$$

$$q_{42} = (-40 - (-40)) / (-13856) = -0$$

$$q_{43} = (0 - (-40)) / (-13856) = -0,009$$

$$q_{51} = (-69,28 - 0) / (-13856) = 0,005$$

$$q_{52} = (69,28 - (-69,28)) / (-13856) = -0,01$$

$$q_{53} = (0 - 69,28) / (-13856) = 0,005$$

$$q_{53} = 1 / 159,395 = 0,006$$

$$C = \begin{vmatrix} 1 & 69,28 & 40 \\ 1 & 0 & -80 \\ 1 & -69,28 & 40 \end{vmatrix} = -13856$$

Расчетные плановые и нормальные координаты представлены в табл. 3.8.

Таблица 3.8 – Результаты расчетов

	q_{31}	q_{32}	q_{33}	q_{41}	q_{42}	q_{43}	q_{51}	q_{52}	q_{53}	q_{66}	C
1 случай	0	0,333	-0,333	0,008	-0,004	-0,004	0	-0,007	0,007	0,006	-16627,2
2 случай	0	0,333	-0,333	0,008	-0,004	-0,004	0	-0,007	0,007	0,006	-16627,2
Погрешность установки ω_y											
1 случай:											
$\begin{vmatrix} a_y \\ b_y \\ c_y \\ \lambda_y \\ \beta_y \\ \gamma_y \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 & 10 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0,333 & -0,333 & 0 & 0 \\ 0,008 & -0,004 & 0,004 & 0 & 0 \\ 0 & -0,007 & 0,007 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0,006 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} 0,46 \\ 0,23 \\ 0,02 \\ 0,125 \\ 0,25 \\ 0 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0,125 \\ 0,25 \\ 0,069 \\ 0,003 \\ -0,001 \\ 0 \end{vmatrix}$											

Продолжение таблицы 3.8

2 случай:											
$\begin{pmatrix} a_y \\ b_y \\ c_y \\ \lambda_y \\ \beta_y \\ \gamma_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 10 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 01 & 0 \\ 0 & 0 & -0,4 & 00 & 0 \\ 0,009 & 0 & -0,009 & 00 & 0 \\ 0,005 & -0,01 & 0,005 & 00 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0,006 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 0,46 \\ 0,23 \\ 0,02 \\ 0,125 \\ 0,25 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0,125 \\ 0,25 \\ -0,008 \\ 0,004 \\ 0,0001 \\ 0 \end{pmatrix}$											

Выявленные позиционные связи элементов технологической системы при многокоординатной обработки цельного корпуса позволили обосновать требования размерной точности и относительного положения базовых и исполнительных поверхностей.

Таким образом, расчетами получены численные значения составляющие погрешности установки корпуса, которые подтверждают возможность повышения точности обработки на многоцелевом станке. за счет соблюдения принципа единства и постоянства баз путем уменьшения составляющих погрешности установки корпуса. Достигаемая точность обработанных поверхностей не ниже IT9-T10.

3.6 Выводы по главе 3

1. На основе анализа технологичности конструкции изделия в соответствии с принципами концепции DFMA, выявлена целесообразность замены сборной конструкции корпуса долота на цельнометаллическую. Это позволяет снизить трудоемкость изготовления инструмента, уменьшить долю слесарно-сборочных работ и автоматизировать ряд операций механообработки и сборки изделия.

2. Предложена методика многоуровневой оценки технологичности конструкции долота, выявлены условия и обоснована целесообразность автоматизации процессов механической обработки и сборки соединений резец-корпус и корпус-ниппель. Сравнение полученных расчётных $K_{т.д.р} = 1,37$ и нормативного $K_{т.л.н} = 0,46$ комплексных коэффициентов технологичности долота

подтвердило правомочность такого подхода, так как выполняется условие $K_{т.л.н} < K_{т.д.р}$.

4. Определены значения коэффициентов экономической эквивалентности дополнительных частных показателей технологичности и комплексный показатель технологичности изделия, оценивающий уровень его пригодности к автоматической сборке. Таким образом, при значениях $K_{т.н} > 0,6$ конструкцию долота можно считать технологичной для автоматической сборки.

5. Предложена усовершенствованная маршрутная технология изготовления алмазного долота с цельнометаллическим корпусом с использованием многокоординатной механической обработки, позволяющая снизить трудоемкость изготовления инструмента на 28-32 % и повысить размерную точность поверхностей.

4. Выявленные позиционные связи элементов технологической системы, проявляемые на этапе многокоординатной обработки цельнометаллического корпуса, позволили обосновать требования размерной точности и относительного положения базовых и исполнительных поверхностей обрабатываемой детали.

5. На основе математического описания формируемой погрешности установки корпуса установлено, что для достижения требуемых параметров точности на этапе сборки долота элементы корпуса должны быть обработаны с точностью не ниже 10-го качества.

Глава 4 Повышение ресурса долота на основе обеспечения качества сборки соединений

4.1 Выявление условий выполнения соединения ниппель - корпус алмазного долота при автоматической сборке

Повышение технического уровня горного машиностроения может быть достигнуто на основе внедрения высокоэффективных технологических процессов, а также комплексной автоматизацией этапов изготовления машин и горного инструмента.

Рассмотрим возможность реализации автоматической сборки для соединения корпус алмазного долота - ниппель. При автоматической сборке резьбовых соединений последовательно выполняется ряд переходов, предусматривающих:

- взаимную ориентацию ниппеля относительно корпуса по фаскам и кромкам сопрягаемых поверхностей;
- наживление резьбовых поверхностей;
- свинчивание деталей;
- затяжка резьбового соединения;
- стопорение соединения [102].

Одним из наиболее ответственных и трудоемких этапов является наживление резьбовых поверхностей, в процессе которого происходит совмещение осей присоединяемой и базовой деталей резьбового соединения (рис. 4.1, *а*). На этом этапе могут возникнуть погрешности относительного положения осей сопрягаемых элементов Δ_Σ и α_Σ . Определим условия гарантированного автоматического сопряжения элементов соединения «корпус-ниппель».

Погрешность положения резьбовой поверхности базовой детали $\varepsilon_{у.б.д.}$ - (рис. 4.1, *а*), определяется, как [2]

$$\varepsilon_{у.б.д.} = \sqrt{\varepsilon_{б.б.д.}^2 + \varepsilon_{з.б.д.}^2 + \varepsilon_{пр.}^2}, \quad (4.1)$$

где погрешность базирования $\varepsilon_{б.б.д}$ зависит от выбранной схемы базирования, а также от погрешности изготовления базовой детали и ее резьбовой поверхности, $\varepsilon_{з.б.д}$ - погрешность закрепления базовой детали; $\varepsilon_{пр}$ - погрешность приспособления.

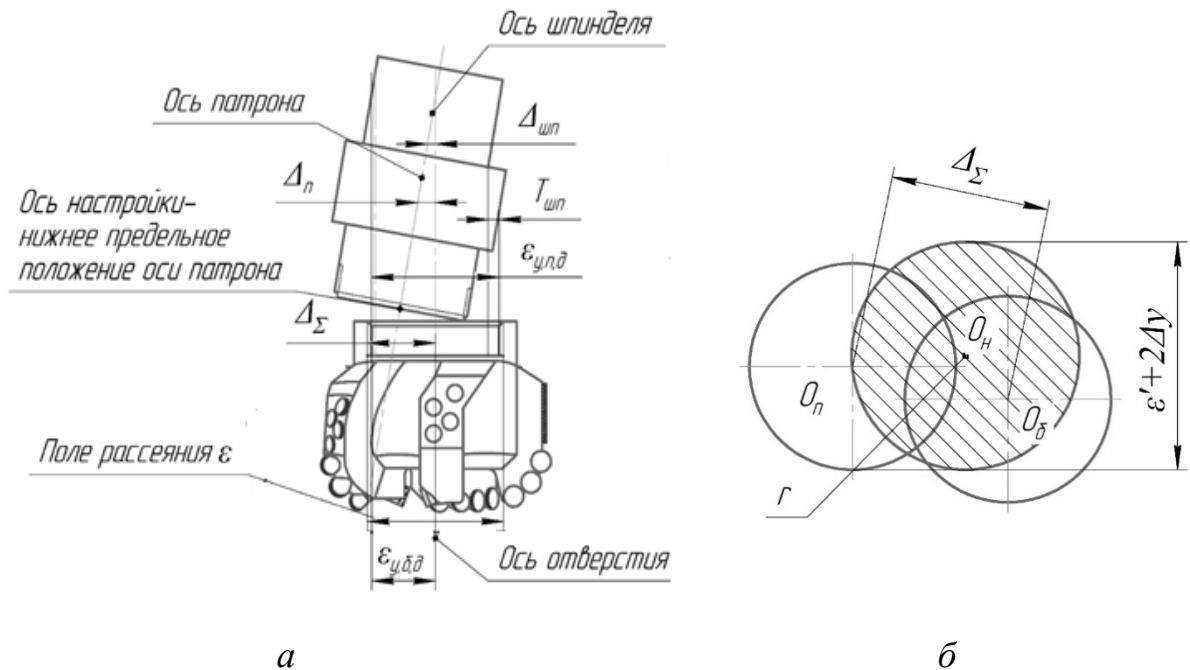


Рисунок 4.1 - Формируемые погрешности относительного положения резьбовых поверхностей деталей при автоматической сборке: *а* – общий вид; *б* - контур перемещения торца ниппеля (присоединяемой детали O_n) перед началом сопряжения с резьбовой поверхностью корпуса ($O_б$)

Погрешность положения резьбовой поверхности присоединяемой детали рассчитывается по формуле

$$\varepsilon_{у.п.д} = \sqrt{\varepsilon_{б.п.д}^2 + \varepsilon_{з.п.д}^2 + \varepsilon_{им}^2} \quad (4.2)$$

где в погрешности базирования ниппеля, как присоединяемой детали, $\varepsilon_{б.п.д}$ учитывают погрешность изготовления ниппеля и его резьбовой поверхности, а в погрешности исполнительного механизма $\varepsilon_{им}$ - погрешность изготовления шпинделя и патрона: $\Delta_{шп}$, Δ_n соответственно.

При вращении ниппеля в патроне исполнительного механизма ось торца резьбовой поверхности, перемещаясь, очерчивает окружность, радиусом r (рис. 12, б), равным

$$r = \frac{\varepsilon_{y.п.д}}{2} + \Delta_y, \quad (4.3)$$

где Δ_y – упругие деформации патрона.

При этом вероятность совмещения осей ниппеля и корпуса долота будет определяться вероятностью попадания оси присоединяемой детали (O_n) в окрестность оси сопрягаемой поверхности базовой детали ($O_б$), определяемую радиальным зазором $\delta_c/2$ [43].

Тогда, первое условие автоматической собираемости можно записать как

$$\frac{\varepsilon_{y.п.д}}{2} + \Delta_y > \frac{1}{2} \varepsilon_{y.б.д} + \Delta_n - (\Sigma f + \frac{\delta_c}{2} + \frac{\Sigma \delta_n}{2}) \quad (4.4)$$

где $\varepsilon_{y.б.д}$, $\varepsilon_{y.п.д}$ – погрешности установки базовой и присоединяемой деталей (корпуса долота и ниппеля); Δ_n – погрешность настройки сборочной позиции; δ_c , Σf и $\frac{\Sigma \delta_n}{2}$ – параметры фасок и центрирующих поясков элементов резьбового соединения.

Вторым условием гарантированной автоматической собираемости на этапе наживления резьбовых поверхностей является выполнение неравенства

$$\alpha_\Sigma < \alpha_{пр}, \quad (4.5)$$

где $\alpha_{пр}$ – предельный угол перекося, при котором может произойти срыв резьбы.

Предельный угол перекося $\alpha_{пр}$ определяют из уравнения

$$\operatorname{tg} \alpha_{пр} = \frac{p - T_{dcp} \operatorname{tg} 30^\circ}{d + d_1 + T_{d_1}} \quad (4.6)$$

где d и d_1 – наружный и внутренний диаметр резьбы; T_{dcp} и T_{d_1} – допуски на средний и внутренний диаметр резьбы; p — шаг резьбы.

Таким образом, исполнительный сборочный механизм не должен допускать перекося присоединяемой резьбовой поверхности на угол $\alpha_\Sigma > \alpha_{пр}$.

При завершении наживления угол α_Σ принимается равным нулю, тогда из выше представленного уравнения получаем условие

$$\frac{\varepsilon_{y.п.д}}{2} = \frac{\varepsilon_{y.б.д}}{2} + \Delta_n, \quad (4.7)$$

для обеспечения, которого в резьбозавертывающем механизме предусматривают дополнительный компенсирующий элемент, который позволяет присоединяемой детали перемещаться и поворачиваться.

*Проверка условий автоматической собираемости ниппеля и корпуса
алмазного долота*

Первое условие автоматической собираемости:

$$\frac{\varepsilon_{y.п.д}}{2} + \Delta_y > \frac{1}{2} \varepsilon_{y.б.д} + \Delta_n - (\Sigma f + \frac{\delta_c}{2} + \frac{\Sigma \delta_n}{2})$$

$\varepsilon_{y.б.д}$ – Погрешность установки для базовой детали (корпуса АД) в радиальном направлении 120 мкм в трехкулачковом патроне.

$\varepsilon_{y.п.д}$ – Погрешность установки для присоединяемой детали 0,1...0,2 мм

Резьбовая часть ниппеля – М160х4-6g

δ_c - радиальный зазор, равный $\delta_c = (S_{\max} + S_{\min}) / 2 = 412,5$ мкм

Σf – фаски сопрягаемых поверхностей (для двух случаев 4 мм и 3 мм)

$\frac{\Sigma \delta_n}{2}$ - центрирующие пояски. В нашем случае $\frac{\Sigma \delta_n}{2} = 0$.

Погрешность надстройки - $\Delta_n = 0,02...0,05$ мм [3-5].

Вторым условием гарантированной автоматической собираемости на этапе наживления резьбовых поверхностей является выполнение неравенства

$$\alpha_\Sigma < \alpha_{пр},$$

где $\alpha_{пр}$ - предельный угол перекося, при котором может произойти срыв резьбы, находится:

$$\operatorname{tg} \alpha_{пр} = \frac{p - T_{dcp} \operatorname{tg} 30^\circ}{d + d_1 + T_{d_1}},$$

где $d = 159,5$ мм наружный диаметр резьбы;

$d_1 = 154,63$ мм, внутренний диаметр резьбы

$p = 4$, шаг резьбы.

$T_{dcp} = (es - ei) = -60 - (-310) = 250$ мкм, - допуск на средний диаметр резьбы;

$T_{d_1} = -60$ мкм, - допуск на внутренний диаметр резьбы [4]

$$\operatorname{tg} \alpha_{\text{пр}} = \frac{4-0,25 \cdot \operatorname{tg} 30^{\circ}}{159,5+154,63-0,06} = 0,012 \text{ рад}$$

По таблице Брагиса $\alpha_{\text{пр}} = 0^{\circ}42'$.

α_{Σ} — принимается 0 градусов, исходя из компенсации соединения захвата робота по фаске.

Таким образом, исполнительный сборочный механизм не должен допускать перекося присоединяемой резьбовой поверхности на угол $\alpha_{\Sigma} > \alpha_{\text{пр}}$.

Погрешность захвата робота (по внутренней части ниппеля с помощью вакуумных присосок) варьируется от 0,1...0,2 мм.

Исходя из этого проверяем первое условие собираемости:

$$\begin{aligned} \frac{\varepsilon_{\text{у.п.д}}}{2} + \Delta_{\text{у}} &> \frac{1}{2} \varepsilon_{\text{у.б.д}} + \Delta_{\text{н}} - (\Sigma f + \frac{\delta_{\text{с}}}{2} + \frac{\Sigma \delta_{\text{п}}}{2}) \\ \frac{0,130}{2} + 0 &> \frac{1}{2} 0,12 + 0,05 - (3 + \frac{0,4}{2} + \frac{0}{2}) \\ 0,65 &> -2,91 \end{aligned}$$

При завершении наживления угол α_{Σ} принимается равным нулю, тогда получаем условие

$$\begin{aligned} \frac{\varepsilon_{\text{у.п.д}}}{2} &= \frac{\varepsilon_{\text{у.б.д}}}{2} + \Delta_{\text{н}}, \\ 130/2 &\approx 120/2 + 0,05 \end{aligned}$$

Таким образом, на основе анализа основных переходов, выполняемых при автоматической сборке резьбовых соединений, выявлены условия автоматического выполнения соединения «корпус-ниппель» алмазного долота на этапе наживления резьбовых поверхностей с учетом формируемых погрешностей относительного положения сопрягаемых элементов соединения.

4.2 Формирование позиционной точности соединения ниппель-корпус алмазного долота в условиях автоматической сборки

Наиболее ответственной технологической операцией изготовления долота является сборка соединения корпус-ниппель, в результате которой образуется неразъемное соединение. Важнейшей задачей при этом является обеспечение

требуемой соосности корпуса и ниппеля, которая играет основную роль в формировании позиционных связей и отклонений корпуса относительно переводника и буровых труб [5], а также радиального биения алмазных зубков при окончательной сборке буровой установки.

Отклонение от заданных параметров соосности влечет за собой:

- нарушение целостности конструкции, которое повышает риск выпадения режущих элементов из корпуса инструмента,
- неравномерность износа лопастей корпуса, приводящая к трудозатратному ремонту и сокращению ресурса инструмента,
- потерю контроля выработки пород буровиками, тем самым повышая время буровых работ.

Следует отметить, что несмотря на широкое применение средств автоматизации на этапах проектирования породоразрушающего инструмента, а также современных высокопроизводительных металлорежущих станков с ЧПУ для механической обработки основных компонентов долот, уровень автоматизации сборочных операций при их производстве пока еще не превышает 15 %. Этому способствуют недостаточное технологическое оснащение сборочных участков и слабая информационная поддержка процесса. Вместе с тем, в настоящий момент и в горном машиностроении наблюдаются положительные тенденции в направлении автоматизации сборки бурового инструмента, как изделия массового спроса. Автоматизация сборочных операций в значительной степени позволит повысить качество его изготовления и надежность дорогостоящего инструмента [10].

Одним из основных и важных условий реализации автоматической сборки является соблюдение принципа полной взаимозаменяемости деталей соединения, что, в свою очередь, выдвигает жесткие требования к геометрической точности сопрягаемых поверхностей [14, 29, 60]. Таким образом, на начальном этапе оценки возможности организации автоматической сборки алмазных долот требуется дать обоснование параметров точности изготовления деталей соединения, обеспечивающих автоматическое

соблюдение заданных допусков расположения при сборке изделия. Такое обоснование проводится на основе определения численных значений формируемой при сборке соединений погрешностей установки.

В соответствии с техническими требованиями на сборку алмазных долот, допуск соосности ниппеля и корпуса составляет $0,3/200$ мм. Он обеспечивается на подготовительном этапе путем ввинчивания ниппеля в корпус (резьбовая стыковка) с последующей фиксацией соединения контактной сваркой по торцевым поверхностям.

Определим составляющие погрешности установки ниппеля в корпус алмазного долота с помощью аналитической теории баз. Для этого необходимо рассмотреть вектор $\omega_y = (a_y, b_y, c_y, \lambda_y, \beta_y, \gamma_y)$, который характеризует относительное расположение элементов соединения. Составляющие погрешности установки a_y, b_y, c_y и $\lambda_y, \beta_y, \gamma_y$ выступают в роли параметров смещения и поворота, определяющие относительное положение координатных осей корпуса и ниппеля [52].

Погрешность относительного положения оси ниппеля и корпуса характеризуется параметрами отклонения $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$ и выступает в качестве приведенной погрешности установки соединения, которая зависит как от составляющих вектора ω_y , так и от положения поверхности соединения относительно системы конструкторских баз [32, 34].

Стыковка поверхностей корпуса и ниппеля в процессе установки на базовые теоретические опорные точки проявляются в виде точек контакта, соответствующие координаты которых непосредственно определяют параметры вектора ω_y как погрешности установки.

Проанализируем процесс формирования погрешности установки ниппеля относительно корпуса алмазного долота с учетом принятой схемы базирования - с использованием двойной опорной базы (рисунок 4.2).

Схема базирования корпуса алмазного долота включает установочную, двойную опорную и опорную базы. Установочной базой служит торец ниппеля, совмещаемый с торцом корпуса (точки 1, 2, 3, рис. 4.2), двойная опорная -

поверхность резьбовой части ниппеля (точки 4 и 5, рис. 4.2), опорная база (точка 6, рис. 4.2) выступает в качестве скрытой базы и обеспечивается силами трения.

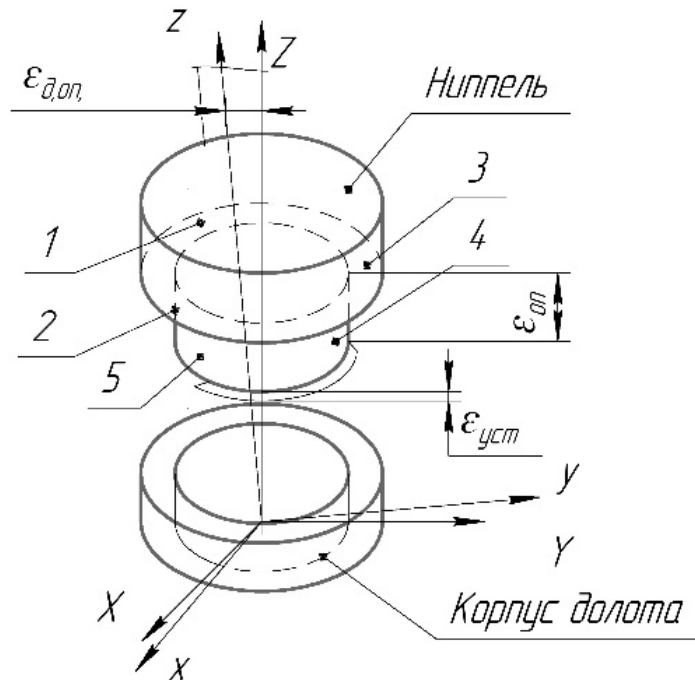


Рисунок 4.2 – Формирование отклонения от соосности при соединении корпуса и ниппеля

Отклонения размера установки, формируемые в направлении принятых конструкторских баз, составляют:

в направлении оси X от двойной опорной базы:

$$\varepsilon_x^{(д.оп)} = a_y^{(д.оп)} + \beta_y^{(уст)} \cdot z + \gamma_y^{(оп)} \cdot y \quad (4.8)$$

в направлении оси Y от двойной опорной базы:

$$\varepsilon_y^{(д.оп)} = b_y^{(д.оп)} + \lambda_y^{(уст)} \cdot z + \gamma_y^{(оп)} \cdot x \quad (4.9)$$

где составляющие имеют индексы соответствующих баз: (уст) – установочная, (д.оп) – двойная опорная, (оп) – опорная.

При базировании ниппеля по конструктивно оформленным опорным элементам параметр смещения $c_y^{(уст)}$, формируемый на установочной базе составляет

$$c_y^{(уст)} = 0,5 \cdot h \quad (4.10)$$

где h – погрешность формы поверхности установочной базы.

Погрешность формы h регламентируется по ГОСТ 24643-81 с учетом допуска на размер между поверхностями соединения и уровня относительной

геометрической точности А, В, С. В общем случае отклонения формы h можно определить как часть допуска IT на размер между рассматриваемыми поверхностями.

$$h = k \cdot IT \quad (4.11)$$

где k – коэффициент, определяющий соотношение $\frac{h}{IT}$,

IT – допуск на высоту головки корпуса.

В соответствии с рекомендациями ГОСТ по определению уровня относительной геометрической точности цилиндрических поверхностей деталей коэффициент k имеет следующие значения, приведенные в таблице 4.1.

Таблица 4.1 - Относительная геометрическая точность поверхностей деталей

Нормальная (группа А) $\frac{h}{IT} \cdot 100 = 60\%$	Повышенная (группа В) $\frac{h}{IT} \cdot 100 = 40\%$	Высокая (группа С) $\frac{h}{IT} \cdot 100 \leq 25\%$
$k = 0,6$	$k = 0,4$	$k \leq 25\%$

С учетом преобразований можно найти $c_y^{(уст)}$ следующим образом:

$$c_y^{(уст)} = 0,5 \cdot k \cdot IT \quad (4.12)$$

Таким образом, параметры смещения $c_y^{(уст)}$, формируемые на установочной базе, можно рассчитать по формулам, представленным в таблице 4.2.

Таблица 4.2 - Относительная геометрическая точность установочной базовой поверхности

Нормальная (группа А) $k = 0,6$	Повышенная (группа В) $k = 0,4$	Высокая (группа С) $k = 0,25$
$c_y^{(уст)} = 0,3 \cdot IT$	$c_y^{(уст)} = 0,2 \cdot IT$	$c_y^{(уст)} = 0,12 \cdot IT$

Параметры относительного поворота $\lambda_y^{(уст)}, \beta_y^{(уст)}$, формируемые по установочной базе соответственно составляют:

$$\lambda_y^{(уст)} = \frac{h}{4L_y} \quad (4.13)$$

$$\beta_y^{(уст)} = \frac{h}{4L_x} \quad (4.14)$$

где L_y и L_x – расстояния между опорными элементами установочной базы в направлении осей Y и X .

С учетом преобразований (4.13, 4.14) параметры относительного поворота принимают вид:

$$\lambda_y^{(уст)} = \frac{k \cdot IT}{4L_y} \quad (4.15) \quad \beta_y^{(уст)} = \frac{k \cdot IT}{4L_x} \quad (4.16)$$

Составляющие погрешности установки $a_y^{(д.оп)}$, $b_y^{(д.оп)}$, формируемые на двойной опорной базе, роль которой выполняет резьба, определяются по формуле:

$$a_y^{(д.оп)} = b_y^{(д.оп)} = 0,25 \cdot (\Delta_{D_1}^B - \Delta_{d_{cp}}^H), \quad (4.17)$$

где $\Delta_{D_1}^B, \Delta_{d_{cp}}^H$ – предельные отклонения размеров метрической резьбы по среднему и наружному диаметру, которые равны $\Delta_{D_1}^B = +274$ мкм и $\Delta_{d_{cp}}^H = +38$ мкм на размер М68х2-6G/6g (по ГОСТ 16093-2004).

Опорная база в данном случае является скрытой, параметр поворота $\gamma_y^{(оп)}$ с учетом радиального зазора в резьбовом соединении (для М68 - 0,236 мм, ГОСТ 16093-2004) принимаем равным 0,00085 мм $\approx$ 0,001 мм. В ряде случаев для резьбовых соединений данный параметр можно принимать равным 0.

Таким образом, с учетом преобразований отклонения размеров $\varepsilon_x^{(д.оп)}$ и $\varepsilon_y^{(д.оп)}$, получаемых от двойной опорной базы в направлении осей X и Y составляют:

$$\varepsilon_x^{(д.оп)} = a_y^{(д.оп)} + \beta_y^{(уст)} \cdot z + \gamma_y^{(оп)} \cdot y \quad (4.18)$$

$$\varepsilon_y^{(д.оп)} = a_y^{(д.оп)} + \lambda_y^{(уст)} \cdot z + \gamma_y^{(оп)} \cdot x \quad (4.19)$$

где x и y равны половине среднего диаметра резьбы.

Соосность ε ниппеля и корпуса определяется как результат смещения осей в двух координатных направлениях $\varepsilon_x^{(д.оп)}$ и $\varepsilon_y^{(д.оп)}$,

$$\varepsilon = \sqrt{\varepsilon_x^{(д.оп)^2} + \varepsilon_y^{(д.оп)^2}} \quad (4.20)$$

Все расчетные значения параметров и коэффициентов сведены в таблицу 4.3.

Таблица 4.3 - Сводная таблица значений коэффициентов

мм	k	h	$c^{(уст)}_y$	$\lambda^{(уст)}_y$	$\beta^{(уст)}_y$	$a^{(доп)}_y$	$b^{(доп)}_y$	$\varepsilon^{(доп)}_x$	$\varepsilon^{(доп)}_y$	ε
Для резьбового соединения М68х2-6G /6g										
Группа А	0,6	0,18	0,09	0,00075	0,0009	0,059	0,059	0,106	0,104	0,149
Группа В	0,4	0,12	0,06	0,0005	0,0006	0,059	0,059	0,102	0,1005	0,143
Проверка, мм			$0,15 = \sqrt{0,106^2 + 0,104^2} = 0,149$							
Для резьбового соединения М160х4-6G /6g										
Группа А	0,6	0,3	0,15	0,0005	0,0009	0,084	0,084	0,138	0,125	0,187
Группа В	0,4	0,2	0,1	0,00036	0,0006	0,084	0,084	0,123	0,116	0,169
Проверка, мм			$0,19 = \sqrt{0,138^2 + 0,125^2} = 0,186$							

Из таблицы 4.3 видно, что погрешность установки тем меньше, чем выше геометрическая точность сопрягаемых поверхностей элементов соединения. Результаты расчета указывают на то, что для достижения требуемой соосности ниппеля и корпуса размерную точность установочной базы следует выдерживать не ниже IT10-11 качества при нормальной степени геометрической точности базовых поверхностей. Ужесточение при необходимости требований геометрической точности повышает стоимость механической обработки деталей и соответственно себестоимость изделия в целом. В связи с этим при анализе и назначении требований точности для корпуса и ниппеля необходимо руководствоваться также ресурсными показателями долота и экономическими соображениями.

4.3 Проработка условий собираемости при автоматической установке ниппеля в корпус долота

Несмотря на существующее многообразие технологий, алмазные долота имеют схожие конструкторско-технологические признаки, благодаря чему представляется возможным изготавливать их с применением типовых технологических процессов.

Известно, что повышение технического уровня и качества горных машин, а также породоразрушающего инструмента может быть достигнуто путем комплексной автоматизации и цифровизации основных этапов

производственного процесса их изготовления. В последние годы на предприятиях машиностроительного комплекса, в том числе горного машиностроения, широко используются автоматизированные системы конструкторско-технологической подготовки производства (АСКТПП), для выполнения механической обработки деталей применяются металлорежущее оборудование с числовым программным управлением (ЧПУ) и промышленные роботы, выполняющие на станках автоматическую установку и снятие заготовок. Вместе с тем в сборочном производстве уровень автоматизации сборочных операций пока невелик и не превышает 10 % [52, 65].

Сложность автоматизации сборочных операций обусловлена рядом причин, к основным из которых относятся [67]: недостаточное развитие теории и технологии автоматизации сборки; разнообразие выполняемых сборочных операций; сложность создания сборочного оборудования для многономенклатурного производства и его высокая стоимость; нетехнологичность конструкций машин; необходимость точной взаимной ориентации деталей соединений и др. Приведенные факторы, собственно, и определяют актуальные направления научно-исследовательских работ в области автоматизации сборочных процессов, в том числе и производстве горного инструмента.

Одним из основных этапов проектирования автоматической сборочной операции является оценка выполнимости условий собираемости. Это означает обеспечение требуемого соотношения параметров относительного положения и движения сопрягаемых деталей, при которых выполняется их автоматическое соединение. В общем случае для описания и обоснования условий соединения различных деталей, например, типа «вал-втулка» данные параметры выявляют из составляющих двух векторов [52]:

1. вектора положения

$$\Delta_k = (\Delta_x, \Delta_y, \Delta_z, \Delta_\lambda, \Delta_\beta, \Delta_\gamma) \quad (4.21)$$

системы координат поверхности присоединяемой детали относительно поверхности базовой детали;

2. вектора линейных и угловых относительных перемещений соединяемых деталей:

$$\eta = (a, b, c, \lambda, \beta, \gamma) \quad (4.22)$$

Более трудоемкой является автоматическая сборка резьбовых соединений и в данном случае соединения ниппеля с отверстием в сборном корпусе долота. Вектор относительных перемещений устанавливаемого ниппеля, который, в данном случае, выполняет функцию винта, имеет вид

$$\eta = (\Delta a, \Delta b, c, \Delta \lambda, \Delta \beta, \gamma). \quad (4.23)$$

Из анализа компонентов вектора относительных перемещений устанавливаемого ниппеля вытекает, что наряду с продольным перемещением с ниппеля вдоль оси отверстия, требуется сообщить ему вращение на угол γ для попадания в нитку резьбы, в результате чего будет выполнено автоматическое навинчивание. Малые смещения $(\Delta a, \Delta b)$ и повороты $(\Delta \lambda, \Delta \beta)$, совершаемые путем пассивной адаптации, обеспечивают самоцентрирование ниппеля в резьбовом отверстии.

Рассмотрим этот вопрос подробнее (рис. 4.3), представляя устанавливаемый ниппель в виде вала (система $X_B Y_B Z_B$), помещаемого в отверстие корпуса (система $x_o y_o z_o$). Для гарантированного автоматического соединения деталей необходимо обеспечить совмещение центра торца вала d_B с центром отверстия корпуса D_o , при этом допускаемое смещение центра торца вала не должно превышать половины наименьшего зазора в соединении $0,5 S_{\text{нм}}$:

$$\Delta_c + \Delta_{\text{п}} \leq 0,5 \cdot S_{\text{нм}}, \quad (4.24)$$

где Δ_c и $\Delta_{\text{п}}$ - отклонения центра вала, обусловленные его линейными смещениями и поворотами относительно отверстия;

$S_{\text{нм}}$ – наименьший зазор, равный $S_{\text{нм}} = D_o - d_B$.

Таким образом, отклонения центра вала $\Delta_c, \Delta_{\text{п}}$, возникающие в результате линейных смещений в направлении двух координатных осей $o_o x_o$ и $o_o y_o$, Δ_x, Δ_y и

относительных поворотов Δ_λ , Δ_β вокруг этих же осей, определяются выражениями:

$$\Delta_c = \sqrt{\Delta_x^2 + \Delta_y^2} = \Delta_{x,y} \sqrt{2} \quad \text{и} \quad \Delta_\Pi = Z \cdot \Delta_\phi = Z \sqrt{\Delta_\lambda^2 + \Delta_\beta^2} = Z \cdot \Delta_{\lambda,\beta} \sqrt{2}$$

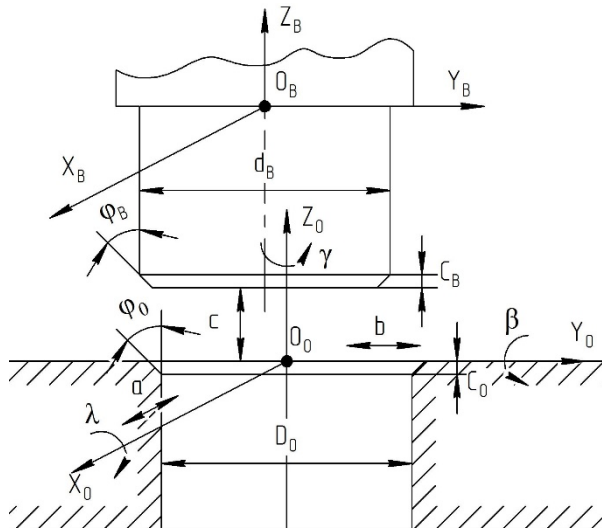


Рисунок 4.3 - Установка ниппеля в отверстие корпуса

Принимая во внимание преобразования, определяющее условие собираемости рассматриваемого соединения, принимает вид:

$$\sqrt{\Delta_x^2 + \Delta_y^2} + Z \sqrt{\Delta_\lambda^2 + \Delta_\beta^2} \leq S_{HM} \quad (4.25)$$

и при $\Delta_x = \Delta_y = \Delta_{x,y}$ и $\Delta_\lambda = \Delta_\beta = \Delta_{\lambda,\beta}$ получим:

$$\sqrt{2} \cdot (\Delta_{x,y} + Z \cdot \Delta_{\lambda,\beta}) \leq 0,5 \cdot S_{HM}$$

$$\text{или} \quad (\Delta_{x,y} + Z \cdot \Delta_{\lambda,\beta}) \leq 0,35 \cdot S_{HM}.$$

В соответствии с этим при равном ограничении линейных и угловых параметров ($\Delta_{x,y} = Z \cdot \Delta_{\lambda,\beta}$), требования к точности относительного положения устанавливаемого в отверстие корпуса ниппеля составят:

$$\pm \Delta_x = 0,17 \cdot S_{HM};$$

$$\pm \Delta_y = 0,17 \cdot S_{HM};$$

$$\pm \Delta_\lambda = 0,17 \cdot S_{HM} / Z;$$

$$\pm \Delta_\beta = 0,17 \cdot S_{HM} / Z$$

Для расширения условий собираемости на соединяемых цилиндрических поверхностях ниппеля и корпуса должны быть предусмотрены фаски, которые при малых пассивных перемещениях ниппеля относительно корпуса, позволяют осуществить самоустановку ниппеля в отверстие корпуса.

Тонкая саморегулировка в пределах образующих поверхностей двух фасок осуществляет пассивную адаптацию, которая обеспечивает решение задач автоматической сборки. Расширение условий собираемости в данном случае адекватно увеличению зазора S_{HM} на величину:

$$P = C_o \cdot tg\varphi_o + C_B \cdot tg\varphi_B \quad (4.26)$$

где C_o, C_B и φ_o, φ_B соответственно ширина и углы наклона фасок в отверстии корпуса и на торце ниппеля.

С учетом преобразований условие собираемости принимает вид:

$$\sqrt{\Delta_x^2 + \Delta_y^2} + Z\sqrt{\Delta_\lambda^2 + \Delta_\beta^2} \leq S_{HM} + C_o \cdot tg\varphi_o + C_B \cdot tg\varphi_B,$$

В соответствии с этим допускаемые расширенные параметры точности положения устанавливаемого ниппеля можно рассчитать по формулам:

$$\text{линейные} \quad \pm \Delta_x = 0,17(S_{HM} + P); \quad \pm \Delta_y = 0,17 \cdot (S_{HM} + P);$$

$$\text{угловые} \quad \pm \Delta_\lambda = 0,17(S_{HM} + P)/Z; \quad \pm \Delta_\beta = 0,17(S_{HM} + P)/Z.$$

Полученные значения $(\pm \Delta_x, \pm \Delta_y)$ и $(\pm \Delta_\lambda, \pm \Delta_\beta)$ являются исходными данными для определения точности позиционирования конечных звеньев применяемой сборочной машины или сборочного робота [12].

Согласно требованиям, ГОСТ 16093-2004 величина зазора в рассматриваемом резьбовом соединении M160x4-6G/6g ниппеля и корпуса долота должна быть в пределах $S = 0,12 \dots 0,705$ мм. В соответствии с этим согласно (9), расширение условий собираемости при $S_{HM} = 0,12$, при ширине фасок $C_o = C_\epsilon = 3 \text{ мм}$ и при одинаковом угле фасок 45° $tg\varphi_o = tg\varphi = 1_\epsilon$ составит:

$$P = 3 \cdot tg\varphi_o + 3_\epsilon \cdot tg\varphi_\epsilon = 6 \text{ мм}$$

Тогда допускаемые расширенные параметры точности положения устанавливаемого ниппеля согласно (11, 12) составят:

$$\text{линейные} \quad \pm \Delta_x = \pm \Delta_y = 0,17(S_{HM} + 6) = 1,04 \text{ мм};$$

$$\text{угловые (при } Z=50) \quad \pm \Delta_\lambda = \pm \Delta_\beta = 0,17(S_{HM} + 6)/50 = 0,2 \text{ (что означает } 12^\circ).$$

При ширине фасок $C_o = C_\epsilon = 4 \text{ мм}$ расширение параметров составит:

$$\text{линейные} \quad \pm \Delta_x = \pm \Delta_y = 0,17(S_{HM} + 8) = 1,38;$$

угловые при ($Z=50$) $\pm \Delta_{\lambda} = \pm \Delta_{\beta} = 0,17(S_{nm} + 8)/50 = 0,3$ (что означает 17°).

Таким образом, при увеличении правильно рассчитанных размеров фасок происходит расширение условий собираемости рассматриваемого соединения, что обеспечивает качественную сборку при автоматической установке ниппеля в корпус [49].

Вывод: Разработке технологических операций автоматической сборки изделий должен предшествовать анализ условий собираемости соединений, на основе которого выявляют требования к технологичности соединяемых деталей узла и точности автоматического сборочного оборудования. В данном случае для расширения условий собираемости резьбового соединения ниппель-корпус алмазного долота выявлена целесообразность увеличения направляющих фасок на сопрягаемых поверхностях деталей. Так, при увеличении ширины фасок с 3 до 4 мм линейные параметры точности положения устанавливаемого ниппеля изменяются с 1,04 до 1,38 мм, угловые (при $Z=50$) - с 12° до 17° , что обеспечивает расширение условия автоматической собираемости данного узла. Полученные результаты расчета позволяют определить исходные данные для определения точности позиционирования конечных звеньев, применяемых для сборочных операций сборочных машин или сборочного робота.

4.4. Уменьшение радиального биения зубков долота путем уменьшения зазора в резьбовом соединении корпуса долота и ниппеля

Требуемая точность долота обеспечивается на заключительных этапах сборки корпуса с припаянными резцами и ниппеля. При этом формируемое радиальное биение наиболее нагруженных зубков, располагаемых на наружном диаметре, где имеет место максимальная окружная скорость и соответственно, воспринимаемые нагрузки, определяется формируемой точностью соединения корпус-ниппель.

Очевидно, что на величину радиального биения зубков существенное влияние оказывают величина зазора в резьбовом соединении, а также

разновысотность устанавливаемых в отверстия калибровочной части корпуса резцов. Таким образом, уменьшить величину радиального биения возможно за счет уменьшения зазора S в резьбовом соединении корпус-ниппель и разновысотности резцов ΔH в диаметральной плоскости долота.

Базирование корпуса долота на ниппеле осуществляется с использованием двойной опорной базы, роль которой выполняет резьба

$$T = (\Delta z_1, \Delta z_2, \Delta z_3, \Delta x_4, \Delta y_5, \Delta x_6) \quad (4.27)$$

где $(\Delta z_1, \Delta z_2, \Delta z_3)$ – нормальные координаты установочной базы, роль которой выполняет торец корпуса;

$(\Delta x_4, \Delta y_5)$ – нормальные координаты двойной опорной базы, роль которой выполняет резьбовая поверхность корпуса;

(Δx_6) – нормальная координата опорной базы, формируемая при затяжке резьбы.

При базировании корпуса с использованием двойной опорной базы значения погрешности установки $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$ формируемые в направлении нормали к трем базам, образующих эту схему базирования рассчитывают по формуле:

$$\begin{vmatrix} \varepsilon_x^{(д.оп)} \\ \varepsilon_y^{(д.оп)} \\ \varepsilon_z^{(уст)} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} a_y^{(д.оп)} \\ b_y^{(д.оп)} \\ c_y^{(уст)} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} 0 & z & y \\ z & 0 & x \\ y & x & 0 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \lambda_y^{(уст)} \\ \beta_y^{(уст)} \\ \gamma_y^{(он)} \end{vmatrix} \quad (4.28)$$

где $a_y^{(д.оп)}, b_y^{(д.оп)}, c_y^{(д.оп)}$ – линейные и $\lambda_y^{(д.оп)}, \beta_y^{(д.оп)}, \gamma_y^{(д.оп)}$ – угловые составляющие вектора погрешности установки ω_y с индексами баз, на которых они формируются : $(уст)$ – установочная; $(д.оп)$ – двойная опорная; $(он)$ – опорная.

На величину радиального биения верхних калибрующих зубков долота, определяющих диаметр отверстия, оказывают прямое влияние отклонения, формируемые на двойной опорной базе $\varepsilon_x^{(д.оп)}, \varepsilon_y^{(д.оп)}$

$$\varepsilon_x^{(д.оп)} = a_y^{(д.оп)} + z \cdot \beta_y^{(уст)} + y \cdot \gamma_y^{(он)} \quad (4.29)$$

$$\varepsilon_y^{(д.оп)} = b_y^{(д.оп)} + z \cdot \lambda_y^{(уст)} + x \cdot \gamma_y^{(он)} \quad (4.30)$$

В приведенных выражениях (4.29, 4.30) составляющие $a_y^{(\partial.on)}, b_y^{(\partial.on)}$ определяют смещение оси резьбовой поверхности корпуса долота относительно оси резьбовой поверхности ниппеля в двух координатных плоскостях. Сумма указанных смещений определяет величину радиального зазора A_Δ в резьбовом соединении

$$A_\Delta = \sqrt{(a_y^{(\partial.on)})^2 + (b_y^{(\partial.on)})^2}, \quad (4.31)$$

уменьшение которого позволяет значительно уменьшить биение режущих зубков долот и, тем самым, повысить их ресурс.

Ниже рассматривается методика расчета допусков и предельных отклонений резьбового соединения, достигаемые при использовании метода групповой взаимозаменяемости, для уменьшения радиального зазора A_Δ в резьбовом соединении ниппель – корпус [66].

Представим соединение корпуса с ниппелем трехзвенной размерной цепью (рис. 4.4)

$$A_\Delta = A_1 - A_2, \quad (4.32)$$

где A_Δ - радиальный зазор в соединении;

A_1 - размер охватывающей детали (диаметр отверстия в корпусе)

A_2 - размер охватываемой детали (диаметр ниппеля)

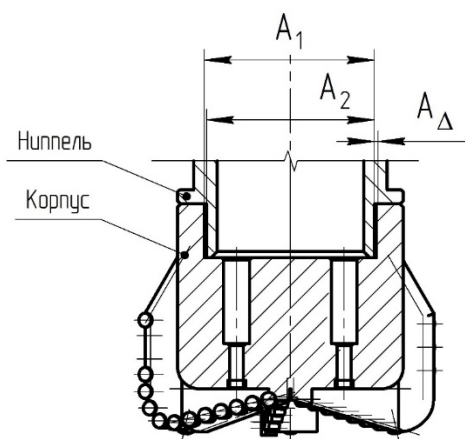


Рисунок 4.4 – Размерная цепь соединения корпуса с ниппелем

Соединение корпуса долота с ниппелем осуществляется по резьбовой посадке

M160 x 4 – 6G/6q

В соответствии с этим, согласно ГОСТ, предельные отклонения диаметрального размера резьбового отверстия в корпусе долота составят

$$\Delta_1^B = 0,395 \text{ мм и } \Delta_1^H = 0,06 \text{ мм,}$$

а предельные отклонения наружного диаметрального резьбового размера ниппеля составят

$$\Delta_2^B = -0,06 \text{ мм и } \Delta_2^H = -0,310 \text{ мм.}$$

В результате чего отклонения зазора в соединении составят:

$$\text{верхнее } \Delta_\Delta^B = \Delta_1^B - \Delta_2^H = 0,395 - (-0,310) = 0,705$$

$$\text{нижнее } \Delta_\Delta^H = \Delta_1^H - \Delta_2^B = 0,06 - (-0,06) = 0,$$

а допуск на зазор составит: $T_\Delta = \Delta_\Delta^B - \Delta_\Delta^H = 0,705 - 0 = 0,705 \text{ мм}$

Метод групповой взаимозаменяемости (селективная сборка) применяют для достижения высокой точности соединения в малозвенных размерных цепях. Его сущность заключается в том, что требуемая точность зазора в соединении и достигается путем включения в размерную цепь составляющих звеньев (деталей), принадлежащих к одной из групп, на которые детали предварительно рассортированы [110].

При методе полной взаимозаменяемости точность зазора определяется допуском

$$T_\Delta = T_1 + T_2, \quad (4.33)$$

где T_1, T_2 - допуски на составляющие звенья A_1 и A_2 ,

или с использованием предельных отклонений: $\Delta_\Delta^B, \Delta_\Delta^H$

$$T_\Delta = \Delta_\Delta^B - \Delta_\Delta^H \quad (4.34)$$

В свою очередь: $\Delta_\Delta^B = \Delta_1^B - \Delta_2^H$ и $\Delta_\Delta^H = \Delta_1^H - \Delta_2^B$,

где Δ_1^B, Δ_1^H и Δ_2^B, Δ_2^H - предельные отклонения на звеньях A_1 и A_2

Повышение точности зазора в соединении в k раз как определяется как отношение допуска на зазор, получаемый в соединении по методу полной взаимозаменяемости T_Δ , к допуску T'_Δ , получаемому с применением метода групповой взаимозаменяемости

$$\kappa = T_{\Delta} / T'_{\Delta} \quad (4.35)$$

При этом коэффициент κ означает принимаемое число групп сортировки.

Учитывая (4.34) и (4.35) из выражения (4.36) находим уменьшенный (в κ раз) допуск T'_{Δ} на зазор, получение которого возможно путем использования метода групповой взаимозаменяемости,

$$T'_{\Delta} = \Delta_{\Delta}^B - \Delta_{\Delta}^H = \frac{T_1 + T_2}{\kappa} = T_{\Delta} / \kappa \quad (4.36)$$

Сборка деталей рассматриваемого соединения обеспечивает получение зазора в пределах

$$\Delta_{\Delta}^B = S_{\max} = 0,705 \text{ мм} \quad \text{и} \quad \Delta_{\Delta}^H = S_{\min} = 0 \text{ мм},$$

Это означает, что допуск на зазор составляет

$$T_{\Delta} = \Delta_{\Delta}^B - \Delta_{\Delta}^H = 0,705 \text{ мм}$$

а координата середины поля допуска

$$\Delta_{0\Delta} = \frac{\Delta_{\Delta}^H + \Delta_{\Delta}^B}{2} = \frac{0,705}{2} = 0,352 \text{ мм}$$

При этом детали соединения должны быть обработаны с точностью:

- отверстие в корпусе $T_1 = 0,335 \text{ мм}$ ($\Delta_1^B = 0,395$ и $\Delta_1^H = 0,06 \text{ мм}$) ;
- ниппель $T_2 = 0,250 \text{ мм}$ ($\Delta_2^B = -0,06 \text{ мм}$ и $\Delta_2^H = -0,310 \text{ мм}$).

Задача повышения точности соединения путем уменьшения допуска на зазор до $T_{\Delta}^* = 0,4 \text{ мм}$ вместо $T_{\Delta} = 0,705 \text{ мм}$ может быть решена путем применения метода групповой взаимозаменяемости при двух группах размерной сортировки ниппелей и корпусов

$$\kappa = \frac{T_{\Delta}}{T_{\Delta}^*} = \frac{0,705}{0,4} = 1,762 \Rightarrow 2$$

Задача дальнейшего повышения точности соединения может быть решена путем уменьшения допуска на зазор до $T_{\Delta}^* = 0,2 \text{ мм}$ вместо $T_{\Delta} = 0,705 \text{ мм}$, что можно осуществить путем организации четырех групп размерной сортировки ниппелей и корпусов долот

$$\kappa = \frac{T_{\Delta}}{T_{\Delta}^*} = \frac{0,705}{0,2} = 3,525 \Rightarrow 4 \quad (4.37)$$

При этом устанавливаемые групповые допуски на диаметральные размеры резьбового отверстия корпуса и резьбовой поверхности ниппеля должны быть кратны принимаемому числу групп сортировки.

Реализация метода групповой взаимозаменяемости возможна при выполнении двух расчетных условий:

Условие I - сумма допусков увеличивающих звеньев должна равняться сумме допусков уменьшающих звеньев

$$\sum_{i=1}^k \bar{T}_i = \sum_{k+1}^{m-1} \bar{T}_i \quad \text{и} \quad T_{\Delta} = \sum_{i=1}^{m-1} T_i \quad (4.38)$$

где k - число увеличивающих звеньев $\bar{T}_i$; m - общее число звеньев.

Условие II - координата середины поля допуска, получаемая на замыкающем звене при расширенных допусках $\Delta'_{0\Delta}$, должна быть равна требуемой координате $\Delta_{0\Delta}$ середины поля допуска:

$$\Delta'_{0\Delta} = \bar{\Delta}'_{01} - \bar{\Delta}'_{02} = \Delta_{0\Delta}. \quad (4.39)$$

Рассмотрим решение рассматриваемой задачи методом групповой взаимозаменяемости при выборе двух групп размерной сортировки.

В этом случае, согласно *условия 1* $\bar{T}_1 = \bar{T}_2$.
численные значения допусков на звенья составят

$$T_1 = T_2 = 0,34.$$

Если координату середины поля допуска звена A_1 оставить без изменения

$$\Delta_{01}^* = \frac{\Delta_1^{*H} + \Delta_1^{*B}}{2} = \frac{0,4 + 0,06}{2} = 0,23 \text{ мм},$$

то выполнение *условия II* означает соблюдение равенства

$$\Delta'_{0\Delta} = \bar{\Delta}'_{01} - \bar{\Delta}'_{02} = \Delta_{0\Delta} \quad \text{и в цифрах} \quad \Delta'_{0\Delta} = 0,23 - \bar{\Delta}'_{02} = 0,352 \text{ мм}, \quad (4.40)$$

из которого следует необходимость коррекции координаты допуска звена A_2 до значения $\Delta_{02}^* = -0,13 \text{ мм}$.

Составим таблицу допусков и предельных отклонений на звенья размерной цепи с учетом расчетных условий метода групповой взаимозаменяемости (табл.4.4).

Таблица 4.4 - Таблица допусков и предельных отклонений на звенья размерной цепи

Параметры точности	Звенья размерной цепи		
	Корпус A ₁	Ниппель A ₂	Зазор A _Δ
T _i [*]	0,34	0,34	0,68
Δ _{0i} [*]	0,23	- 0,13	0,36
Δ _i ^B	0,4	0,05	0,7
Δ _i ^H	0,06	- 0,3	0

Затем составим таблицу сортировки деталей (корпуса долота и ниппеля) по резьбовым размерам базовой резьбы M160 x 4 – 6G/6q для принятых двух групп сортировки (таблица 4.5)

Таблица 4.5 - Таблица сортировки деталей

Предельные отклонения	Корпус A ₁		Ниппель A ₂		Зазор A _Δ	
	Нижнее Δ _i ^H	Верхнее Δ _i ^B	Нижнее Δ _i ^H	Верхнее Δ _i ^B	Нижнее Δ _i ^H	Верхнее Δ _i ^B
Группа I	0,06	0,23	- 0,3	- 0,125	0,18	0,53
Группа II	0,23	0,4	- 0,125	0,05	0,18	0,53

При сборке соединений из деталей, принадлежащих определенной группе, точность зазора обеспечивается по методу полной взаимозаменяемости, поэтому правильность расчета проверяем по формулам предельных отклонений:

$$\text{верхнее } \Delta_{\Delta}^B = \Delta_1^B - \Delta_2^H \quad (4.41) \quad \text{и нижнее } \Delta_{\Delta}^H = \Delta_1^H - \Delta_2^B. \quad (4.42)$$

а затем по формуле $\Delta_{\Delta}^B = \Delta_{\Delta}^B - \Delta_{\Delta}^H$ рассчитываем зазор в соединении

Для деталей первой группы

$$\Delta_{\Delta}^B = 0,23 - (-0,3) = 0,53 \text{ мм} \quad \Delta_{\Delta}^H = 0,06 - (-0,125) = 0,18$$

$$\Delta_{\Delta}^B = 0,53 - 0,18 = 0,35$$

Для деталей второй группы

$$\Delta_{\Delta}^B = 0,4 - (-0,125) = 0,53 \text{ мм} \quad \Delta_{\Delta}^H = 0,23 - 0,05 = 0,18$$

$$\Delta_{\Delta}^B = 0,53 - 0,18 = 0,35$$

Проведенная проверка показала правильность расчета точности деталей.

Рассмотрим задачу дополнительного повышения точности соединения корпуса долота и ниппеля при использовании метода групповой взаимозаменяемости с выполнением четырех групп сортировки (таблица 4.6)

Таблица 4.6 – Таблица допусков и предельных отклонений

	Звенья размерной цепи		
Параметры точности	Корпус А ₁	Ниппель А ₂	Зазор А _Δ
T_i^*	0,34	0,34	0,68
Δ_{0i}^*	0,23	- 0,13	0,36
Δ_i^B	0,4	0,05	0,7
Δ_i^H	0,06	- 0,3	0

На основе приведенной таблице составим таблицу сортировки деталей (корпуса долота и ниппеля) по резьбовым размерам базовой резьбы М160 х 4 – 6G/6q для принятых четырех групп сортировки (табл. 4.7)

Таблица 4.7 - Таблица сортировки деталей

	Корпус А ₁		Ниппель А ₂		Зазор А _Δ	
Предельные отклонения	Нижнее Δ_i^H	Верхнее Δ_i^B	Нижнее Δ_i^H	Верхнее Δ_i^B	Нижнее Δ_i^H	Верхнее Δ_i^B
Группа I	0,06	0,15	- 0,3	- 0,24	0,3	0,45
Группа II	0,15	0,24	- 0,24	- 0,18	0,33	0,48
Группа III	0,24	0,33	- 0,18	- 0,12	0,36	0,51
Группа IV	0,33	0,42	- 0,12	- 0,06	0,39	0,54

Правильность расчета проверяем по формулам предельных отклонений:

$$\text{верхнее } \Delta_{\Delta}^B = \Delta_1^B - \Delta_2^H \quad \text{и} \quad \text{нижнее } \Delta_{\Delta}^H = \Delta_1^H - \Delta_2^B,$$

а затем по формуле $\Delta_{\Delta}^B = \Delta_{\Delta}^B - \Delta_{\Delta}^H$ рассчитываем зазор в соединении

Для деталей первой группы

$$\Delta_{\Delta}^B = 0,15 - (-0,3) = 0,45 \text{ мм} \quad \Delta_{\Delta}^H = 0,06 - (-0,24) = 0,3$$

$$\Delta_{\Delta}^B = 0,45 - 0,3 = 0,15 \text{ мм}$$

Для деталей второй группы

$$\Delta_{\Delta}^B = 0,24 - (-0,24) = 0,48 \text{ мм} \quad \Delta_{\Delta}^H = 0,15 - (-0,18) = 0,33$$

$$\Delta_{\Delta}^B = 0,48 - 0,33 = 0,15 \text{ мм}$$

Для деталей третьей группы

$$\Delta_{\Delta}^B = 0,33 - (-0,18) = 0,51 \text{ мм} \quad \Delta_{\Delta}^H = 0,24 - (-0,12) = 0,36$$

$$\Delta_{\Delta}^B = 0,51 - 0,36 = 0,15 \text{ мм}$$

Для деталей четвертой группы

$$\Delta_{\Delta}^B = 0,42 - (-0,12) = 0,54 \text{ мм} \quad \Delta_{\Delta}^H = 0,33 - (-0,06) = 0,39$$

$$\Delta_{\Delta}^B = 0,54 - 0,39 = 0,15 \text{ мм}$$

Анализ приведенных расчетов показывает, что применение метода групповой взаимозаменяемости позволяет уменьшить зазор в резьбовом соединении корпуса долота и ниппеля. В результате существенно снижается радиальное биение зубков и повышается ресурс работы алмазного долота.

При организации двух групп сортировки размеров радиальный зазор в соединении уменьшается в два раза

$$\text{с } S_{\max} = 0,7 \text{ мм до } S_{\max} 0,35 \text{ мм,}$$

а при организации четырех групп сортировки радиальный зазор в соединении уменьшается более чем в четыре раза

$$\text{с } S_{\max} = 0,7 \text{ мм до } S_{\max} 0,15 \text{ мм.}$$

Если в результате возникновения случайных отклонений резьбовые размеры на корпусе долота или на ниппеле выходят за пределы рассчитанных групповых допусков, то для исключения незавершенного производства применяют метод доработки. Согласно методу доработки по размерам такой детали изготавливают соединяемую с ней деталь, размеры которой обеспечивают требуемую точность соединения.

4.5 Уменьшение погрешности радиального биения зубков алмазного долота на этапе технологического процесса сборки

Согласно техническим требованиям на изготовление алмазного долота $\varnothing = 215,9$, допуск на диаметральный размер, ограничивающий радиальное биение калибрующих режущих зубков составляет $T_{\varnothing} = 0,51$ мм при

$$\Delta^B = 0, \quad \Delta^H = - 0,51 \text{ мм}$$

Это означает, что наибольший диаметр долота, образуемый калибрующими зубками, составляет $\varnothing_{\max} = 215,9$,

а наименьший диаметр составляет $\varnothing_{\min} = 215,9 - 0,51 = 215,39$

Допуск на диаметр калибрующих зубков $T_{\varnothing} = 0,51$ ограничивает отклонения, порождаемые действием ряда факторов:

1. отклонение от соосности цилиндрической поверхности корпуса с осью базовой резьбы (вероятное значение 0,3);
2. отклонение от соосности, обусловленное наличием зазора в базовой резьбе (допуск на зазор 0,7);
3. отклонение от соосности, обусловленное разновысотностью режущих зубков (вероятное значение 0,2);

$$\{T_{\varnothing} = 0,51\} \leftrightarrow \{(0,3), (0,7); (0,2)\}$$

Оси калибрующих зубков алмазного долота располагаются в плоскости перпендикулярной к оси долота под углом наклона $\alpha = 4^{\circ} \dots 6^{\circ}$ относительно касательной, проходящей через точку центра зубка. В соответствии с этим при изменении высоты зубка в направлении его оси на величину Δ_H происходит изменение вылета зубка в радиальном направлении на величину Δ_R

$$\Delta_R = \Delta_H \cdot \sin \alpha, \text{ мм} \quad (4.43)$$

Зубки, получаемые путем спекания твердого сплава, согласно ГОСТ 880-75 на твердосплавные изделия для горного инструмента имеют точность по высоте указанную в табл. 3.2.

Таблица 4.8 - Параметры точности твердосплавных зубков

Диаметры зубков	$\varnothing 11^{+0,3}$	$\varnothing 13^{+0,3}$	$\varnothing 14^{+0,4}$
Высота зубков H	$12 \pm 0,3$	$15 \pm 0,3$	$17 \pm 0,4$
Допуски на высоту T_H	0,6	0,6	0,8

В соответствии с этим для зубков $\varnothing 13^{+0,3}$ при допуске на высоту 0,6 мм и синусе угла наклона оси $\sin 6^{\circ} = 0,1$ мм изменения вылета зубков в радиальном направлении составят:

$$\text{верхнее } \Delta_R^B = \Delta_H^B \cdot \sin \alpha = 0,3 \cdot 0,1 = 0,03 \text{ мм}$$

$$\text{нижнее } \Delta_R^H = \Delta_H^H \cdot \sin \alpha = -0,3 \cdot 0,1 = -0,03 \text{ мм}$$

и допуск

$$T_R = T_H \cdot \sin \alpha = 0,6 \cdot 0,1 = 0,06 \text{ мм.}$$

В свою очередь, отклонения глубины отверстий Γ в корпусе долота под зубки составляют $\Gamma \pm 0,4$ мм и с учетом расположения отверстий под углом наклона 6° ($\sin 6^\circ = 0,1$) предельные отклонения торца отверстий в радиальном направлении составят:

$$\text{верхнее } \Delta_{R\Gamma}^B = \Delta_\Gamma^B \cdot \sin \alpha = 0,4 \cdot 0,1 = 0,04 \text{ мм}$$

$$\text{нижнее } \Delta_{R\Gamma}^H = \Delta_\Gamma^H \cdot \sin \alpha = -0,4 \cdot 0,1 = -0,04 \text{ мм}$$

и допуск

$$T_{R\Gamma} = T_\Gamma \cdot \sin \alpha = 0,8 \cdot 0,1 = 0,08 \text{ мм.}$$

Представим вылет зубков как замыкающее звено H_Δ трехзвенной размерной цепи (рис. 4.5)

$$H_\Delta = H_1 - H_2 \quad (4.44)$$

где H_1 - высота установленного зубка; H_2 - глубина отверстия под зубки.

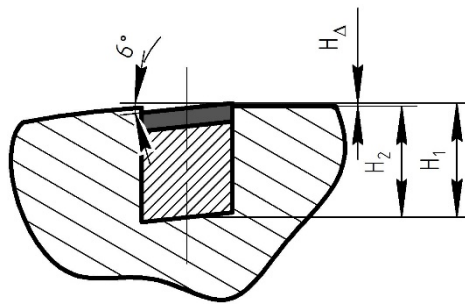


Рисунок 4.5 – Размерная цепь зубка в виде замыкающего звена

Согласно приведенным выше расчетам допуски на составляющие звенья составят для $H_1 \rightarrow T_1 = 0,06$ и $\Delta_1^B = \Delta_R^B = 0,03$; $\Delta_1^H = \Delta_R^H = -0,03$

$$\text{для } H_2 \rightarrow T_2 = 0,08 \text{ и } \Delta_2^B = \Delta_{R\Gamma}^B = 0,04; \Delta_2^H = \Delta_{R\Gamma}^H = -0,04$$

В этом случае при использовании в процессе сборки метода полной взаимозаменяемости, при котором подбор зубков по глубине отверстий не выполняют, на замыкающее звено получим:

$$\text{допуск } T_\Delta = T_1 + T_2 = 0,06 + 0,08 = 0,14 \text{ мм}$$

$$\text{и предельные отклонения } \Delta_\Delta^B = 0,07 \text{ и } \Delta_\Delta^H = -0,07.$$

Для уменьшения радиального биения долота, обусловленного разноразмерностью устанавливаемых зубков и разной глубиной отверстий под

зубки, применим метод групповой взаимозаменяемости с использованием двух групп сортировки высоты зубков и глубины отверстий.

Выполним два расчетных условия реализации метода групповой взаимозаменяемости.

Условие I - допуск увеличивающего звена $\bar{T}_1$ равен допуску уменьшающего звена $\bar{T}_2$

$$\bar{T}_1 = \bar{T}_2 = 0,08 \text{ мм}$$

Условие II - координата середины поля допуска, получаемая на замыкающем звене при расширенных допусках $\Delta'_{0\Delta}$, должна быть равна требуемой координате $\Delta_{0\Delta}$ середины поля допуска:

$$\Delta'_{0\Delta} = \bar{\Delta}'_{01} - \bar{\Delta}'_{02} = \Delta_{0\Delta} \quad \text{и в данном случае} \quad \Delta'_{0\Delta} = \Delta_{0\Delta} = 0.$$

Составим таблицу допусков и предельных отклонений на звенья размерной цепи с учетом расчетных условий метода групповой взаимозаменяемости (табл.4.9).

Таблица 4.9 - Таблица допусков и предельных отклонений звеньев цепи

Параметры точности	Звенья размерной цепи		
	Высота зубков H_1	Глубина отверстия H_2	Вылет зубков H_Δ
T_i^*	0,08	0,08	0,16
Δ_{0i}^*	0	0	0
Δ_i^B	0,04	0,04	0,08
Δ_i^H	- 0,04	- 0,04	- 0,08

Затем составим таблицу сортировки зубков по высоте и отверстий в корпусе долота под зубки по их глубине для принятых двух групп сортировки (табл.4.10).

Таблица 4.10 - Таблица сортировки зубков по высоте и отверстий в корпусе по глубине

	Высота зубков H_1		Глубина отверстия H_2		Вылет зубков H_Δ	
	Нижнее Δ_i^H	Верхнее Δ_i^B	Нижнее Δ_i^H	Верхнее Δ_i^B	Нижнее Δ_i^H	Верхнее Δ_i^B
Группа I	- 0,04	0	- 0,04	0	- 0,04	0,04
Группа II	0	0,04	0	0,04	- 0,04	0,04

Правильность расчета проверяем по формулам предельных отклонений:

$$\text{верхнее } \Delta_{\Delta}^B = \Delta_1^B - \Delta_2^H \quad (4.45) \quad \text{и} \quad \text{нижнее } \Delta_{\Delta}^H = \Delta_1^H - \Delta_2^B. \quad (4.46)$$

а затем по формуле $T_{\Delta} = \Delta_{\Delta}^B - \Delta_{\Delta}^H$ рассчитываем допуск, определяющий отклонение зубков в радиальном направлении

Для деталей первой группы

$$\Delta_{\Delta}^B = 0 - (-0,04) = 0,04 \text{ мм} \qquad \Delta_{\Delta}^H = -0,04 - 0 = -0,04$$

$$T_{\Delta} = 0,04 - (-0,04) = 0,08$$

Для деталей второй группы

$$\Delta_{\Delta}^B = 0,04 - 0 = 0,04 \text{ мм} \qquad \Delta_{\Delta}^H = 0 - 0,04 = -0,04$$

$$T_{\Delta} = 0,04 - (-0,04) = 0,08$$

Проведенная проверка показала правильность расчета точности высоты зубков и глубины отверстий в корпусе под зубки по методу групповой взаимозаменяемости. При этом сравнение полученных значений с предельными отклонениями и допусками, рассчитанными ранее для метода полной взаимозаменяемости, показало двукратное повышение точности - двукратное уменьшение радиального биения режущих зубков

- метод полной взаимозаменяемости - метод групповой взаимозаменяемости

$$\begin{array}{ll} T_{\Delta} = 0,14 & T_{\Delta} = 0,08 \\ \Delta_{\Delta}^B = 0,07; \Delta_{\Delta}^H = -0,07 & \Delta_{\Delta}^B = 0,04; \Delta_{\Delta}^H = -0,04 \end{array}$$

При выполнении техпроцесса сборки измеряют высоту зубков и сортируют их на две группы. А затем измеряют глубину отверстия в корпусе, и согласно таблицы сортировки устанавливают до упора соответствующий по размеру зубок. После чего выполняют пайку зубка

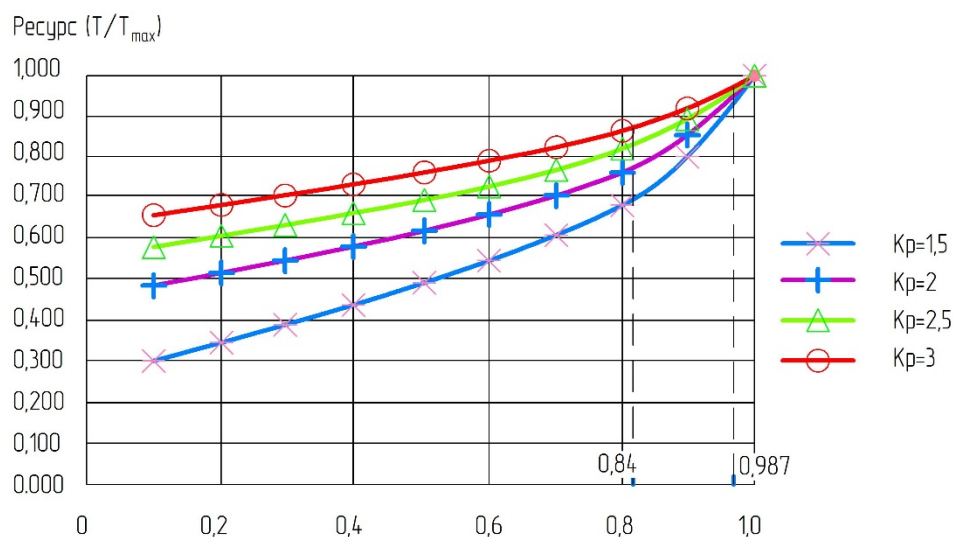


Рисунок 4.6 - Уровень качества и ресурс резьбового соединения ниппель-корпус, достигнутый селективной сборкой

Таким образом, при использовании принципов селективной сборки представляется возможным уменьшить групповой допуск на зазор в резьбовом соединении и повысить уровень качества изделия от 0,94 при зазоре 0,35 мм и до 0,987 при зазоре, равном 0,15 мм. Это означает, что ресурс соединения при данных величинах зазора, благодаря уменьшению радиального биения, составит соответственно в среднем до 0,95 от максимального значения, равного 1 (рис. 4.6).

4.6 Выводы по главе 4

1. На основе моделирования позиционных связей, формуемых при сборке соединения ниппель-корпус, определены условия их автоматической собираемости. Так, для гарантированного автоматического соединения ниппеля с корпусом по резьбовой поверхности необходимо выдерживать предельный угол перекоса в диапазоне $0...0^{\circ}42'$, что предотвращает срыв резьбы при наживлении.

2. На основе применения методов аналитической теории баз выявлены погрешности установки ниппеля в корпус и дана оценка их влияние на позиционную точность деталей соединения. Установлено, что для достижения требуемой соосности в соединении до 0,3 мм размерную точность установочной базы необходимо выдерживать по IT10, при этом рекомендуется предпринять меры по уменьшению зазора в резьбовом соединении.

3. Для расширения условий автоматической собираемости резьбового соединения необходимо увеличить ширину направляющих фасок на сопрягаемых поверхностях с 3,0 до 4,0 мм с целью достижения линейных параметров позиционной точности с 1,04 до 1,38 мм, а угловые с 12 до 17° .

4. Для уменьшения радиального биения резцов долота необходимо уменьшить допуск на зазор в резьбовом соединении с 0,705 мм до 0,35 или 0,15 мм, что достигается использованием селективной сборки, при которой детали соединений сортируются соответственно на две или 4 группы. В результате представляется возможным повысить уровень качества сборки долота с 0,84 до 0,987, что приводит к повышению ресурса в среднем до 0,95 от максимального его значения.

5. Применение метода селективной сборки для соединений резец-корпус позволило повысить их позиционную точность за счет уменьшения допуска на радиальное биение резцов T_R с 0,14 мм до 0,08 мм, что безусловно способствует повышению ресурса алмазного долота.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация является законченной научно-квалификационной работой, в которой на основе выполненных теоретических исследований разработаны научно обоснованные конструкторско-технологические решения, обеспечивающие достижение требуемых параметров точности алмазного долота на основе выявления и анализа формируемых позиционных связей элементов конструкции на этапах его изготовления и определяющих пути повышения ресурса бурового инструмента, что имеет важное научное и практическое значение для отечественной горной промышленности.

Основные научные результаты, выводы и рекомендации, полученные лично автором:

1. На основании анализа конструкции, специфики эксплуатации и причин отказов алмазных долот выявлены и обоснованы требования точности изготовления и сборки бурового инструмента, а также методы их достижения

2. На основе анализа технологичности конструкции изделия, в соответствии с принципами концепции DFMA, выявлена целесообразность замены сварной конструкции корпуса долота на цельнометаллическую, что позволяет снизить трудоемкость изготовления инструмента на 28...32%, уменьшить долю слесарно-сборочных работ и автоматизировать ряд операций механообработки и сборки изделия.

3. Дана сравнительная оценка расчетных комплексных и частных показателей технологичности конструкции алмазного долота с нормативными параметрами, на основе которой обоснована целесообразность и возможность применения автоматизированной сборки инструмента; так, при полученных значениях $K_{т.д.р.}=1,37$ и $K_{т.д.н.}=0,46$ выполняется основное условие приспособленности конструкции к автоматизированной сборке $K_{т.д.р.} > K_{т.д.н.}$.

4. Выявлены и проанализированы показатели качества долот, оказывающие наибольшее влияние на ресурс инструмента – позиционная точность и радиальное биение резцов. Установлено, что существующие

технологии изготовления долот отличаются высокой трудоёмкостью, значительной долей пригоночных работ, низким уровнем автоматизации, что осложняет достижение требуемых параметров точности на этапах механической обработки и окончательной сборки. В связи с этим предложен прогрессивный технологический маршрут изготовления долота, позволяющий обеспечить высокие параметры точности базовых и исполнительных поверхностей не ниже 10 квалитета за счет снижения погрешностей установки.

5. На основе моделирования позиционных связей, формуемых при сборке соединения ниппель-корпус, определены условия их автоматической собираемости. Для гарантированного автоматического соединения деталей по резьбовой поверхности необходимо выдерживать предельный угол перекоса в диапазоне $0...0^{\circ}42'$, что предотвращает срыв резьбы.

6. Для расширения условий автоматической собираемости резьбового соединения необходимо увеличить ширину направляющих фасок на сопрягаемых поверхностях с 3,0 до 4,0 мм с целью достижения линейных параметров позиционной точности с 1,04 до 1,38 мм, а угловые с 12 до 17° .

7. Применение метода селективной сборки для соединений резец-корпус позволило повысить их позиционную точность за счет уменьшения допуска на радиальное биение резцов с 0,14 мм до 0,08 мм, что безусловно способствует повышению ресурса алмазного долота.

8. Уменьшение радиального биения резцов долота достигается за счет снижения допуска на зазор в резьбовом соединении с 0,7 мм до 0,35 мм и 0,15 мм, при помощи селективной сборки, при которой детали соединений сортируются на 2 или 4 группы. В результате обеспечения требуемой точности резьбового соединения уровень качества долота повысился с 0,84 до 0,987, что позволяет повысить ресурс инструмента в среднем до 0,95 от максимального его значения.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 26474-88. Долота и головки бурильные алмазные и оснащенные сверхтвердыми композиционными материалами. Типы и основные размеры // М.: Государственный комитет СССР по стандартам, 1988, - 8 с.
2. ГОСТ 14.201-83. Обеспечение технологичности конструкции изделий. Общие требования // М.: Стандартиформ, 2005, - 9 с.
3. ГОСТ 24705-2004. Основные нормы взаимозаменяемости. Резьба метрическая. Основные размеры // М.: Стандартиформ, 2005, - 19 с.
4. ГОСТ 28487 – 2018. Соединения резьбовые упорные с замковой резьбой элементов бурильных колонн. Общие технические требования // М.: Стандартиформ, 2005, - 24 с.
5. ГОСТ 7360 – 2015. Переводники для бурильных колонн. Технические условия. // М.: Стандартиформ, 2015, - 32 с.
6. Андреев Г.Н., Схиртладзе А.Г., Новиков В.Ю. Проектирование технологической оснастки машиностроительного производства. Учебник / М.: Высшая школа, 2001. 414с.
7. Бакиев Р.Т., Пятницкий А.С. Применение PDC долот ONYX при бурении карбонатных и солевых отложений Ярактинского НГКМ в Иркутской области // Инженерная практика. – 2011. –№ 10. – С. 8–9.
8. Балаба В.И., Бикбулатов Н.К., Вышегородцева Г.Н. и др. Буровой породоразрушающий инструмент Учебное пособие для вузов. – М.: РГУ нефти и газа имени И. М. Губкина, 2013, 251 с.: ил.
9. Балакшин Б.С. Основы технологии машиностроения. – М.: Машиностроение, 1969, 559с.
10. Балакшин Б.С. Теория и практика технологии машиностроения. В 2-х кн. М.: Машиностроение, 1982. Кн. 1. 283 с.; Кн. 2. 268 с.
11. Баранов Е.Г., Крымский В.И. Современное состояние и пути развития теории разрушения горных пород. - Изв. Вузов. Горный журнал, 1989. - №2. С. 1-10.
12. Башкатов, Д. Н. Исследование процесса алмазного бурения с

позиции системного подхода. Сб. Разработка и совершенствование методов и средств оптимизации и автоматизации процессов алмазного бурения, – ВИТР, – Л.: 1988, – с. 19–24.

13. Бегагоен А.И, Бойко А.И. Повышение точности и долговечности бурильных машин / Недра. М. 1986. 211 с.

14. Безъязычный В. Ф., Семенов А. Н. Научные и методические основы сборки. Состояние теории // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2004. № 4. С. 3–7.

15. Блинов Г.А., Васильев В.И., Глазов М.Г. Алмазосберегающая технология бурения. – Л.: Недра, 1989. – 184 с.

16. Богомолов Р.М. Буровое алмазное долото с защитой промывочных насадок // Известия Самарского научного центра Российской академии наук, т. 20, № 4(2), 2018, 183 – 185 с.

17. Богомолов Р.М., Гринев А.Н., Сериков Д.Ю. Буровое долото с разноориентированным алмазными резцами // Сфера. Нефть и Газ. 2019. № 5 (73). С. 42-49.

18. Богомолов Р.М., Носов Н.В. Буровой инструмент. Энциклопедия изобретений (1914-2014 гг.). Первая часть. М: Инновационное Машиностроение, 2015. – 400с.

19. Богомолов Р.М., Носов Н.В. Буровой инструмент. Энциклопедия изобретений (1914-2014 гг.). Вторая часть. М: Инновационное Машиностроение, 2015. – 427с.

20. Богомолов, Р. М. Буровое долото с алмазными резцами. Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море / Богомолов Р. М., Гринев А. М., Сериков Д. Ю. – 2019. – № 12. – С. 28-34.

21. Бондаренко Н.А., Жуковский А.Н., Мечник В.А. Исследование износа алмазных буровых долот. Анализ температурных полей. Разведка и разработка нефтяных и газовых скважин. Украина. №3(20), 2006, 89 – 92 с.

22. Борисов К. И. Современные способы оценки эффективности разрушения горных пород резанием-скалыванием долотами типа PDC //

Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2022. Т. 333. № 6. 103–121

23. Борисов К.И. Современные методы оценки сопротивления горных пород резанию-скалыванию при бурении долотами PDC. –Томск: Изд-во ТПУ, 2013. – 166 с.

24. Борисов К.И. Научный метод оценки эффективности процессов динамического разрушения горных пород при бурении скважин современными инструментами режуще-скалывающего действия: дис.... д-ра техн. наук. – Томск, 2012. – 197 с.

25. Борисов М. А. Обеспечение соосности резьбосварных соединений буровых алмазных долот на основе структурно упорядоченной сборки: дис. на соискание ученой степени канд.техн.наук:05.02.08 – Технология машиностроения. ГОУ ВПО «Самарский государственный технический университет»/ОАО «Волгабурмаш», Самара, 2008 – 154 с.

26. Бугаков В. И., Лаптев А. И. Технология изготовления буровых долот при высоких давлениях и температурах с применением новых алмазных материалов // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2017. – Т. 60. № 1. – С. 36 – 42.

27. Будюков Ю.Е., Власюк В.И., Спирин В.И. Алмазный породоразрушающий инструмент. – Тула: ИПП «Гриф и К°», 2005. – 288 с.

28. Буринтех. Каталог продукции [Электронный ресурс]. – 2023. – Режим доступа: <https://burintekh.ru/products/rddt/pdc/>. (Дата обращения 11.01.2023)

29. Вартанов М. В., Чан Чунг Та. Сборочное производство: проблемы и решения //Станкоинструмент, 2020, № 2.

30. Воздвиженский Б. И., Мельничук И. П., Пешалов Ю. А. Физико-механические свойства горных пород и влияние их на эффективность бурения. М., «Недра», 1973, 240 с.

31. Волик Д.А. Буровые породаразрушающие инструменты: Учеб.пособие для вузов. - М.: РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина, 2014. - 94

с.: ил.

32. Достижение точности зазора с использованием групповой взаимозаменяемости / В.А. Тимирязев, А.Г. Схиртладзе, А.А. Иванов и др. / Ж. Ремонт, восстановление, модернизация. №1 . 2018. с. 30-34

33. Епифанов В. И., Песина А. Я., Зыков Л. В. Технология обработки алмазов в бриллианты. М., 1976

34. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике / Перевод с англ. Под ред. Б.Е. Победри.- М.: Мир, 1975.- 541 с.

35. Исаев М.И. К расчету оптимального режима разрушения породы при алмазном бурении./М.И. Исаев, П.В. Пономарев. Методика и техника разведки. Сб. научных трудов № 92, ОНТИ ВИТР, Л.: 1974.-С.26-39.

36. Калинин А.Г., Справочник инженера-технолога по бурению глубоких скважин / А.Г. Калинин, Р.А. Ганджумян, А.Г. Мессер. — М. Недра, 2005. — 724 с.

37. Калинин, А.Г. Справочник инженера-технолога по бурению глубоких скважин / А.Г. Калинин, Р.А. Ганджумян, А.Г. Мессер. — М. : Недра, 2005. — 724 с.

38. Каталог горных шарошечных долот ОАО «ВБМ-групп» (В составе холдинга - ОАО «Волгабурмаш» г. Самара; и др.) 2007, 46 с.

39. Киселев А. Т. Вращательно-ударное бурение геологоразведочных скважин./ А.Т. Киселев, И.Н. Крусир и др. М.: Недра, 1982.-103с. :ил.

40. Козловский Е.А. Кибернетика в бурении./Е.А. Козловский, В.М. Питерский, М.А. Комаров. М.: Недра, 1982. - 298 с.:ил.

41. Корнеев К.Е., Палий П.А. Буровые долота. Справочник, М. Недра, 1971.

42. Корнилов, Н.И. Породоразрушающий инструмент для геологоразведочных скважин / Н.И. Корнилов, В.С. Травкин, Л.К. Берестень, Д.И. Коган. — М.: Недра, 1979. — 119-120 с.

43. Косова В.А., Гасюк Д.П. К вопросу анализа условий разработки технологических процессов машиностроительных предприятий // Известия

Тулъского государственного университета. Технические науки. 2021. № 2. С. 655-658.

44. Леонов Е.Г., Симонянц С.Л. Совершенствование технологического процесса углубления скважины: Учебное пособие. - М.: Издательский центр РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина, 2014. - 184 с.

45. Лшпкевич Ю. Ф., Асеева А. Е., Третьяк А. А. Разработка методики расчета наработки породоразрушающего инструмента с алмазно-твердосплавным вооружением // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2010. – №. 12. – С. 2-5.

46. Марамзин А. В., Блинов Г. А. Алмазное бурение на твердые полезные ископаемые. Технология работ. Л., «Недра», 1977. 248 с.

47. Мартюшова А.А. Направления и перспективы развития буровых долот // Инновационные технологии в машиностроении: сборник трудов XIII Международной научно-практической конференции / Юргинский технологический институт. – Томск, 2022, 26-29 с.

48. Мартюшова А.А. Сравнительный анализ конструкции н резцов алмазных долот // Сборник научных трудов Донецкого национального технического университета «Прогрессивные технологии и системы машиностроения», №4 (75) 2021, 42-47 с.

49. Мартюшова А.А., Клементьев А.Н. Выявление условий выполнения соединения «корпус – ниппель» алмазного долота при автоматической сборке // Сборник трудов Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых «Инновационные идеи в машиностроении» (ИИМ-2022) / СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2022. 29-32 с.

50. Мартюшова А.А., Нгуен Тхэ Винь, Мнацаканян В.У. Проработка условий собираемости при автоматической установке ниппеля в корпус долота // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. – 2023. – №19. – С. 180-184

51. Мартюшова А.А., Хазанова О.В., Новикова А.Д. Формирование позиционной точности соединения ниппель - корпус алмазного долота //

Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. – 2022. – №16. – С. 127-132

52. Мнацаканян В.У., Севагин С.В, Нго Ву Нгуэн, Мартюшова А. А. Эффективные технологии восстановления штоков гидроцилиндров горных машин // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2022. — № 5 (специальный выпуск 4). — С. 12–19. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_5_4_12.

53. Набатников Ю.Ф. Метод селективной сборки соединений деталей машин в условиях мелкосерийного производства // Сборки в машиностроении и приборостроении. – 2012. – № 9. – С. 19–32.

54. Набатников Ю.Ф. Обеспечение точности в соединениях деталей горных машин обобщенным методом групповой взаимозаменяемости // Горное оборудование и электромеханика. – 2009. – № 11. – С. 5–11.

55. Набатников Ю.Ф. Повышение ресурса соединений деталей машин с зазором // Автомобильная промышленность. – 2012. – № 4. – С. 15–18.

56. Недыхалов М., Богомолов Р.М. Повышение стойкости алмазного вооружения долот PDC. Ашировские чтения. 2020. Т. 1. № 1 (12). С. 272-275.

57. Нескоромных В. В., Чихоткин А. В. Аналитическое исследование механики разрушения горных пород резцами PDC с учетом динамических процессов резания-скалывания горной породы и сопротивления среды // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2020. – № 4. – С. 127–136.

58. Нескоромных, В. В. Разработка алмазного бурового долота для направленного бурения / Нескоромных В. В., Петенёв П. Г., Лысаков Д. В., Попова М. С., Головченко А. Е., Лиу Б. // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2022. – Т. 333. – № 5. – С. 116-125.

59. Нескоромных, В. В. Разрушение горных пород при бурении скважин алмазным буровым инструментом: монография / В. В. Нескоромных, М. С. Попова, Л. Баочанг. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2020. – 268 с.

60. Общемашиностроительные нормативы времени и режимов резания для нормирования работ, выполняемых на универсальных и многоцелевых станках с числовым программным управлением. — М.: Экономика, 1990. — Ч. I.

Нормативы времени. — 208 с.

61. Общемашиностроительные нормативы времени и режимов резания для нормирования работ, выполняемых на универсальных и многоцелевых станках с числовым программным управлением. — М.: Экономика, 1990. — Ч.

II. Нормативы режимов резания. — 311 с.

62. Ока А.В., Душко С. Р. К исследованию разрушения горной породы долотами, оснащенными резцами PDC. Научные исследования № 6 (17). Том 2. 2017, 15 – 18 с.

63. Онищин В.П. О характере износа импрегнированных коронок при бурении диабазов. ОНТИ ВИТР. Сб. «Методика и техника разведки», №54.-Л.: 1965. -с.30-33.

64. Осецкий А.И. Разработка методов и средств регенерации алмазов и компонентов матриц алмазных коронок с целью их повторного использования: Автореф. дис. докт. техн. наук /Московская государственная геологоразведочная академия -М., 2000-42 с.

65. Основы технологии машиностроительного производства. Мнацаканян В.У., Морозов В.В., Схиртладзе А.Г. и др Учебник для вузов. Издательство ВГУ. Владимир. 2011, т.1 271 с., т. 2336 с.

66. Островский М.С., Мнацаканян В.У., Тимирязев В.А. Программирование обработки деталей горных машин / Горная книга. 2009. 227с.

67. Оценка и прогнозирование качества машин. Радкевич Я.М., Тимирязев В.А., Островский М.С. / Ж. Технология и автоматизация монтажа. №2, 2002г., Польша, ТЕКОМА.

68. Пак, М.С. Долота StingBlade с алмазными коническими элементами / М.С. Пак. // Бурение и нефть. — 2015. — № 6. — 51 с.

69. Патент RU 2 377 384, Российская Федерация, МПК E21B 10/567. Буровое долото с поликристаллическими алмазными элементами // Некрасов И. Н., Богомоллов Р.Н., Ищук А. Г., Гавриленко М.В., Морозов Л.В, Мухаметшин М.М. // ОАО "Волгабурмаш". Заяв.: 2008115011/03, 16.04.2008 Оpubл.: 27.12.2009 Бюл. № 36

70. Патент RU 2 532 950, Российская Федерация, МПК E21B 10/42 (2006.01) E21B 10/54 (2006.01). Размещение режущих элементов на буровом долоте с фиксированными резцами, обеспечивающее сокращение растрескивания алмазных пластинок // Дейвид Гейвиа (US), Флойд С. Фелдерхофф (US), Маттью Р. Исбелл (US), Майкл Л. Достер (US) // Бейкер Хьюз Инкорпорейтед (US). Заяв.: 2012108432/03, 04.08.2010 Оpubл.: 20.11.2014 Бюл. № 32

71. Патент RU 2 588 532, Российская Федерация, МПК E21B 10/54. Алмазное буровое долото // Гринев А. М., Ремнев В. В., Серых К. С., Харымов А. А., Стрыгин А. И. // ОАО "Волгабурмаш". Заяв.: 2014139861/03, 2014.10.01 Оpubл.: 27.06.2014

72. Победоносцева, Н.Н. Экономическая эффективность алмазных долот / Н.Н. Победоносцева, В.И. Егоров, Б.А. Мац. — М. : Недра, 1972. — 44 с.

73. Повышение эксплуатационных характеристик горного оборудования путем нанесения защитных покрытий газотермическими методами. Балдаев Л.Х., Балдаев С.Л., Маньковский С.А. / Сборник научных трудов семинара «Современные технологии в горном машиностроении», МГГУ, М.2012, с.99-107.

74. Попов А. М. Моделирование сборочной технологичности конструкции изделий в интегрированных САПР // Вестник ДГТУ. 2012. № 1(62), вып. 1, 99 – 109 с.

75. Попов А.Н. и др. Графический метод выбора буровых долот. Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2019. Т. 330. № 11. 69–76

76. Попова М.С. Компьютерное моделирование процессов, протекающих при бурении скважин / М.С. Попова, А.Ю. Харитонов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 330. - № 12. – С. 18–27

77. Попова М.С. Научные основы разработки алмазного бурового инструмента методами компьютерного моделирования процессов разрушения

горных пород: дис. на соискание уч. ст. д.т.н.:25.00.14. Красноярск, 2022, - 272 с.

78. Породоразрушающий инструмент для геологоразведочных скважин. Корнилов Н.И., Травкин В.С., Берестень Л.К. и др. Справочник. М. Недра, 1979.

79. Потемкин А.Н., Карягин Д.С. О возникновении первичных погрешностей при формировании показателей качества автоматизированной сборки резьбовых соединений / Научно-методический электронный журнал Концепт. 2016. № Т15. С. 1816-1820.

80. Программирование операций механообработки деталей машин на станках с ЧПУ и обрабатывающих центрах: учебник / В. А. Тимирязев, А. Г. Схиртладзе, Г. А. Мелетьев, В. Е. Шебашев; под ред. В. А. Тимирязева. – Йошкар-Ола: Поволжский государственный технологический университет, 2017. – 324 с.

81. Проектирование технологии: Учебник для студентов машиностроительных специальностей вузов / И. М. Баранчукова, А. А. Гусев, Ю. Б. Крамаренко и др.: под общ. ред. Ю. М. Соломенцева. – М.: Машиностроение, 1990. – 416 с.: ил. (Технология автоматизированного машиностроения).

82. Протасов Ю.Л. Разрушение горных пород. - М.: МГГУ, 1995. -453с.

83. Радкевич, Я. М. Метрология, стандартизация и сертификация в 3 ч. Часть 1. Метрология: учебник для вузов / Я. М. Радкевич, А. Г. Схиртладзе. — 5-е изд., перераб. и доп. — Москва: Издательство Юрайт, 2023. — 235 с.

84. Расчет припусков и межпереходных размеров в машиностроении / Радкевич Я.М., Тимирязев В.А., Схиртладзе А.Г., Островский М.С./ Под ред. Тимирязева В.А. М.: Высшая школа, 2007. 272с.

85. Рахимов, А. А. Сравнительный анализ отработки алмазных и шарошечных долот / Рахимов А. А., Эшонкулов К. Э., Жураев Ш. Н. // Вестник науки и образования. – 2021. – № 17-3 (120). – С. 17-20.

86. Соловьев Н.В. Основы конструирования алмазного породоразрушающего инструмента. Соловьев Н.В., В.Ф. Чихоткин, В.И. Власюк, Р.А. Ганджумян и др. М.: МГГА, 2000. - 111 с.:ил.

87. Солод Г.И., Радкевич Я.М. Управление качеством горных машин.

Учебное пособие. МГИ. М. 1985.

88. Спирин В.И. Новые направления создания алмазного породоразрушающего инструмента./В.И. Спирин, Д.М. Левин. Тул. гос. ун-т. Тула.: 2000. - 149 с.:ил.

89. Справочник нормировщика /А.В. Ахумов, Б.М. Генкин, Н.Ю. Иванов и др. — Л.: Машиностроение. Ленинградское отд-е, 1986. — 456 с.

90. Справочник технолога машиностроителя. В 2-х томах под ред. А.Г. Косиловой и Р.К. Мещерякова. М.: Машиностроение, 1986, т. 1. 656 с.; т. 2, 496 с.

91. Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х т. Т. 2 / Под ред. А. С. Васильева, А. А. Кутина; 6-е изд., перераб. и доп. — М.: Инновационное машиностроение, 2018. — 818 с.

92. Стефанив Б. В. Особенности индукционной пайки алмазно-твердосплавных резцов с лопастью корпуса составного бурового долота // Международный научно-технический и производственный журнал «Автоматическая сварка». — 2013. — №8/1013. — с. 50-55.

93. Стефанив Б. В. Разработка технологии пайки алмазно-твердосплавных резцов // Международный научно-технический и производственный журнал «Автоматическая сварка». — 2013. — №2/1013. — с. 37-42.

94. Сулакшин С, С. Бурение геологоразведочных скважин: Справочное пособие. - М.: Недра, 1991. —334 с.: ил.

95. Твердосплавные изделия для горного инструмента. Каталог ОАО Кировоградский завод твердых сплавов. 2005 45 с.

96. Технология автоматической сборки / А. Г. Холодкова, М. Г. Кристаль, Б. Л. Штриков и др.: под ред. А. Г. Холодковой. — М. Машиностроение, 2010. — 560 с.:ил.

97. Технология машиностроения. Мнацаканян В.У., Морозов В.В., Схиртладзе А.Г. и др Учебник для вузов. Издательство ВГУ. Владимир. 2013, 523 с.

98. Третьяк А.Я., Попов В.В., Гроссу А.Н., Борисов К.А. Инновационные подходы к конструированию высокоэффективного породоразрушающего инструмента // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2017. – № 8 – С. 225–230.

99. Трушкин О.Б. Выбор долот PDC в соответствии с твердостью и абразивностью горных пород. Территория Нефтегаз, №6, июнь 2015, 34 – 38 с.

100. Tran M. Разработка конструкций долот при помощи использования программных средств// Нефтегазовые технологии. – 2008. – № 3. – С. 32.

101. Федотова А.М., Гасюк Д.П. Анализ рисков возникновения проблем с качеством технологической подготовки производства и разработка мероприятий по их снижению в условиях АО "НИИЭФА" // Металлообработка. 2021. № 1 (121). С. 50-54.

102. Холодкова А.Г., Максимович Б.Д. Автоматизация проектирования технологических процессов автоматической сборки // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2004. №4. С.14-18.

103. Хостикоев М.З. Повышение эффективности изготовления деталей на многоцелевых станках путем выполнения на них резьбонакатных операций / Докторская диссертация. РГУ нефти и газа (НИУ) имени М.И. Губкина / М. 2012, 290 с.

104. Чулкова В.В. разработка методических и технологических решений по выбору долот PDC с усиленным антивибрационным вооружением. дис. на соискание уч. ст. к.т.н.:25.00.15. М, 2017, 129 с.

105. Шарауова А.Б. Идентификация модели буримости и прогнозирование показателей бурения горных пород (на примере месторождения Узень): дис. на соискание ак. ст. доктора философии PhD: 6D070800. Республика Казахстан, Алматы, 2018, 124 с.

106. Эгамбердиев И.П. Исследование и обоснование метода оценки технического состояния бурового оборудования. Автореферат кандидатской диссертации. М. МГУ. 2007. 26 с.

107. Bazaluk Oleg, Velychkovych Andrii, Ropyak Liubomyr, Pashechko

Mykhailo, Pryhorovska Tetiana, Lozynskyi Vasyl. Influence of Heavy Weight Drill Pipe Material and Drill Bit Manufacturing Errors on Stress State of Steel Blades. // *Energies* 2021, 14, 4198, <https://doi.org/10.3390/en14144198>.

108. Brook B. Principles of diamond tool technology for sawing rock // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. – 2002. – 39(1). – P. 41–58.

109. Drill bit: Patent 2020/0149350 A1 US. Fil. 9.11.2019; Pub. Date: 14.05. 2020.

110. Gerbaud L., Menand S., Sellami H., PDC bits: all comes from the cutter rock interaction, in: *IADC/SPE Drilling Conference*, Miami, E' tats-Unis, 2006, p. 1.

111. Jaworska L., Szutkowska M., Klimczyk P., Sitarz M., Bucko M., Rutkowski P., Figiel P., Lojewska J. Oxidation, graphitization and thermal resistance of PCD materials with the various bonding phases of up to 800°C // *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. – 2014. – 45. – P. 109-116.

112. Kochegarova N.A., Pankratova Ya.S. Drilling with PDC-type diamond bits. В сборнике: *ADVANCED RESEARCH: PROBLEMS AND NEW APPROACHES*. сборник статей Международной научно-практической конференции. Петрозаводск, 2021. С. 157-160.

113. Liu S., Han L., Zou Y., Zhu P., Liu B. Polycrystalline diamond compact with enhanced thermal stability // *Journal of Materials Science & Technology*. – 2017. – 33 (11). – P. 1386-1391.

114. Optimization model for polycrystalline diamond compact bits based on reverse design / Zhijiu Ai, Yiwei Han , Yuchun Kuang, YuanjiWang and Mingming Zhang // *Advances in Mechanical Engineering*, 2018, Vol. 10(6) 1–12

115. Wojtanowicz A.K., Kuru E., Mathematical modeling of PDC bit drilling process based on a single-cutter mechanics, *Journal of Energy Resources Technology*, 115 (4) (1993) 247–256.

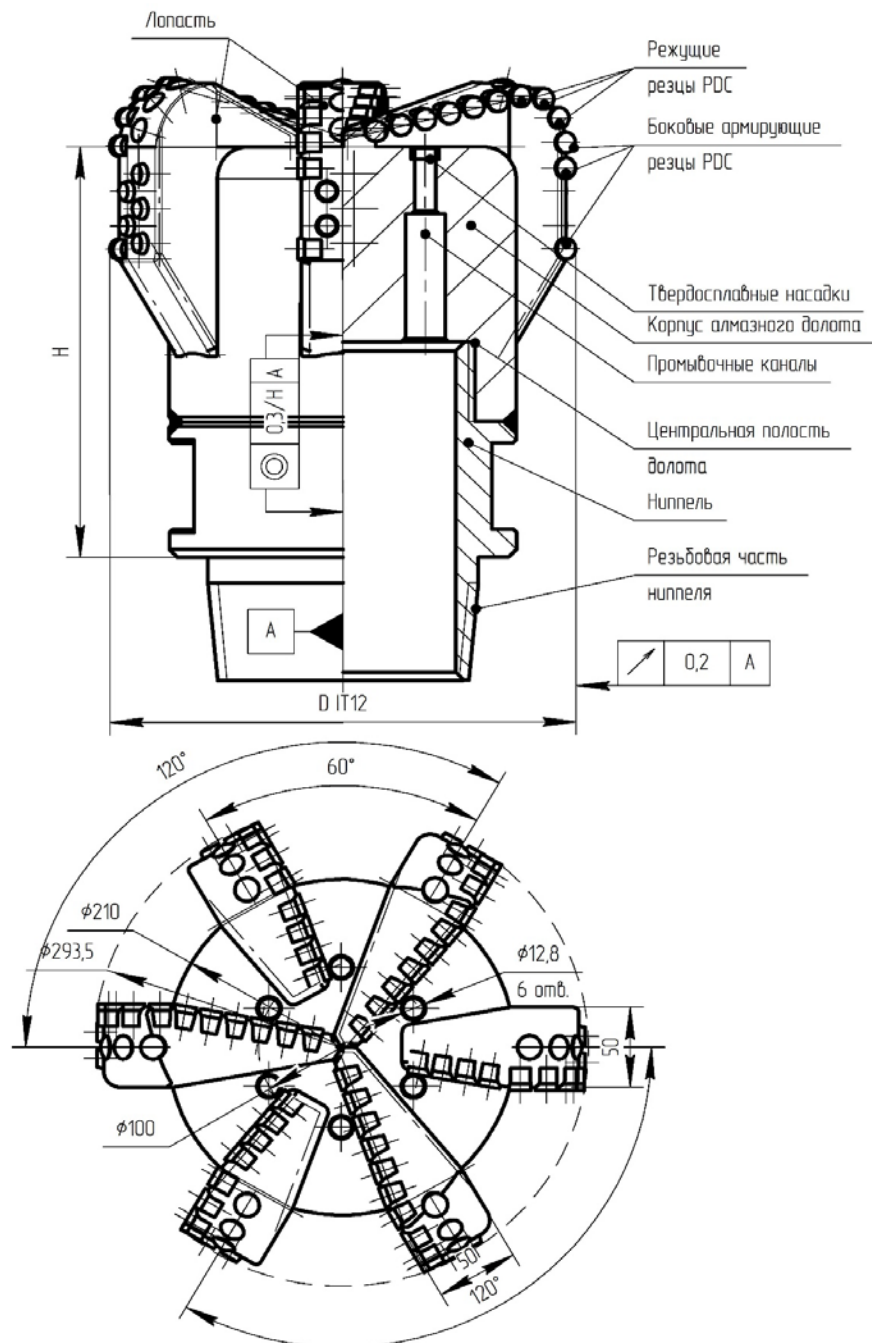
116. Yahiaoui, Malik and Gerbaud, Laurent and Paris, Jean-Yves and Denape, Jean and Dourfaye, Alfazazi A study on PDC drill bits quality. (2013) *Wear*, vol. 298-299 . pp. 32-41.

117. Комбинированные долота PDC/TRICONE (Hebei Ruishi Bits Manufacturing Co., Ltd., КНР) <https://ru.epec.com/portal/page/international/product>.

118. Брошюра КазДуко Сервисез. Эл. ресурс: <https://kazduco.com/ru/brochures>. Дата обращения 20.05.2023 г.

119. Stinger. Алмазный конический элемент. За гранью возможностей // Инженерная практика. – 2013. – № 11. – Режим доступа: <http://lib.glavteh.ru/publicationreader/303/?folder=demo#page/1/mode/1up>.

ПРИЛОЖЕНИЕ А Рабочие чертежи алмазного долота

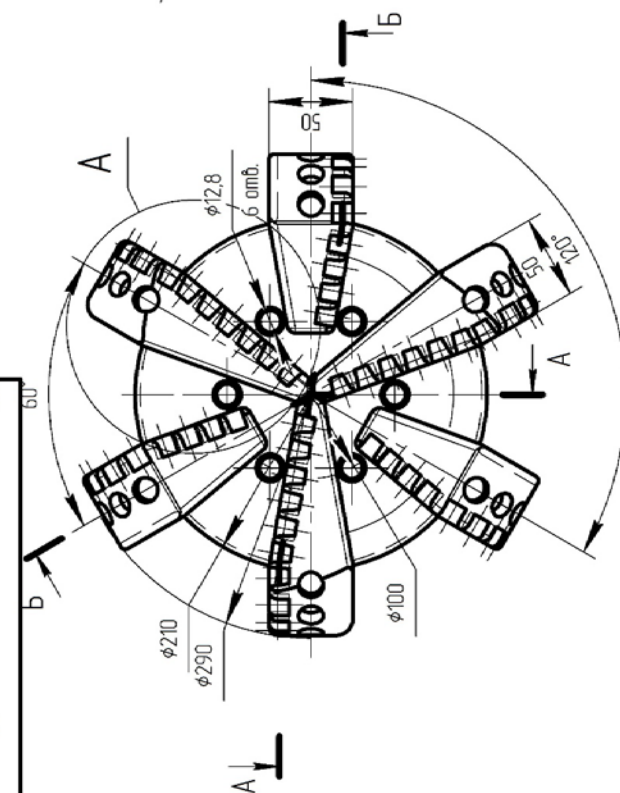
[illegible]

Не для коммерческого использования

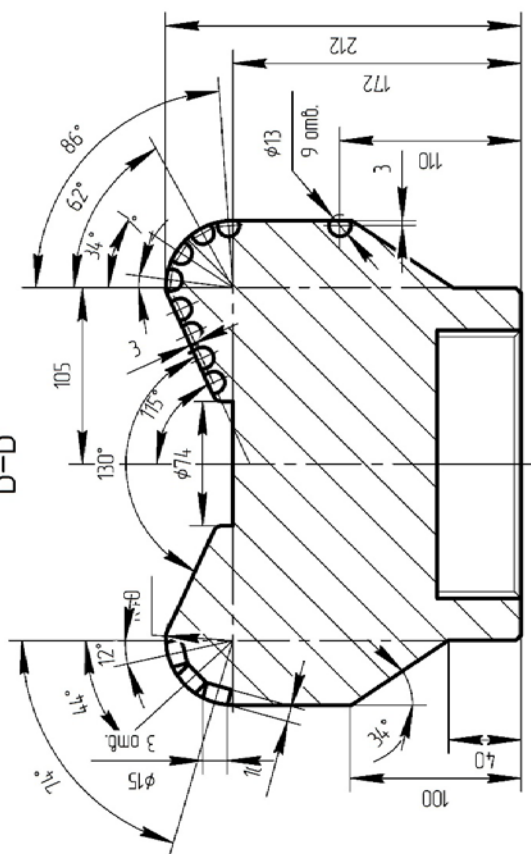
Копировал

Формат А4

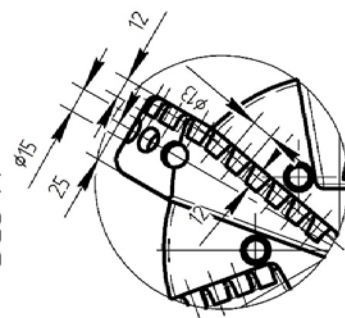
Корпус алмазного долота



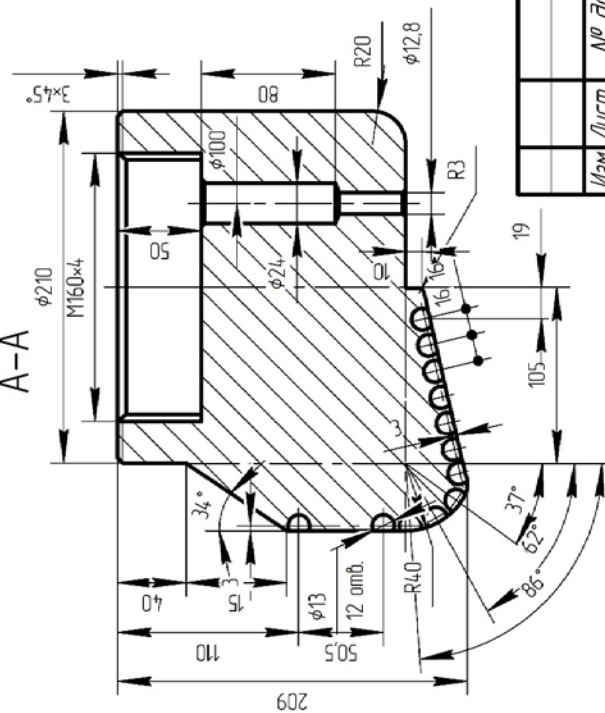
Б-Б



Вид А



А-А



Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

Корпус алмазного долота

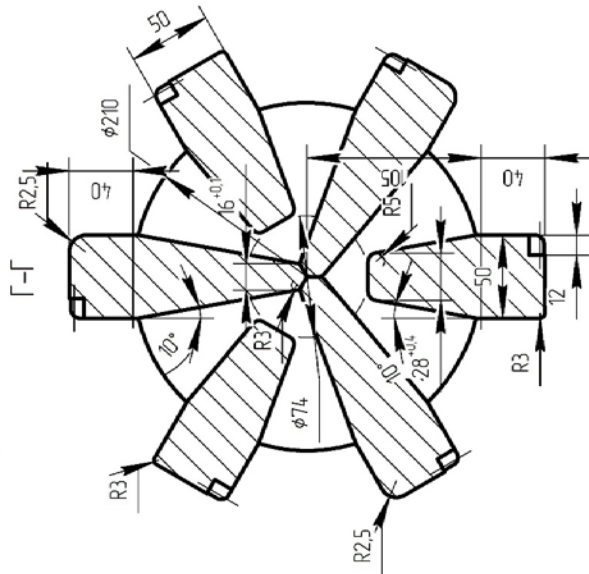
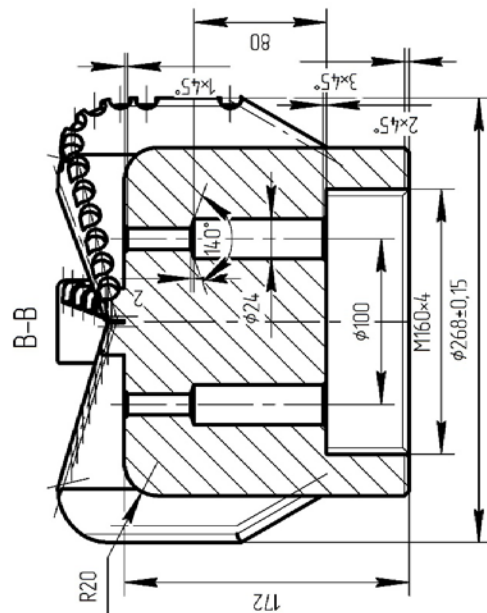
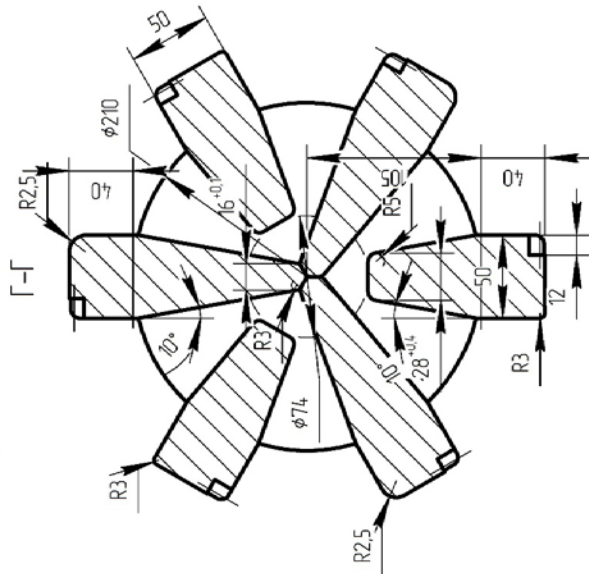
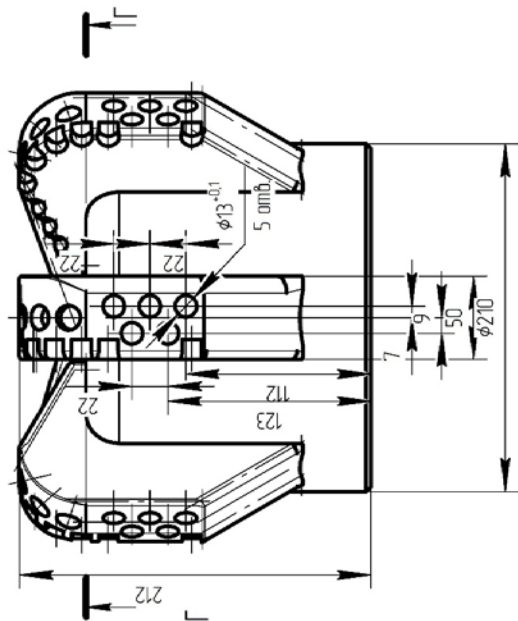
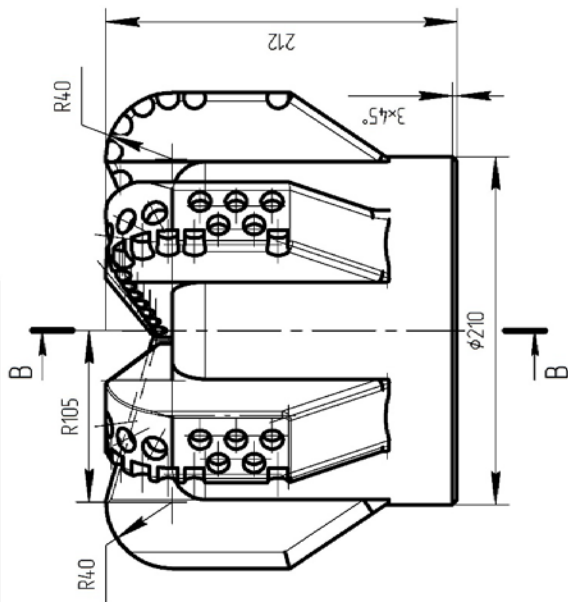
Копировал

Формат А4

Лист

Инд. № подл.	Подп. и дата	Взам. инд. №	Инд. № дубл.	Подп. и дата

Корпус алмазного долота



Изм. № подл.	Подп. у дѣла	Взам. инв. №	Изм. № дѣла	Подп. у дѣла
--------------	--------------	--------------	-------------	--------------

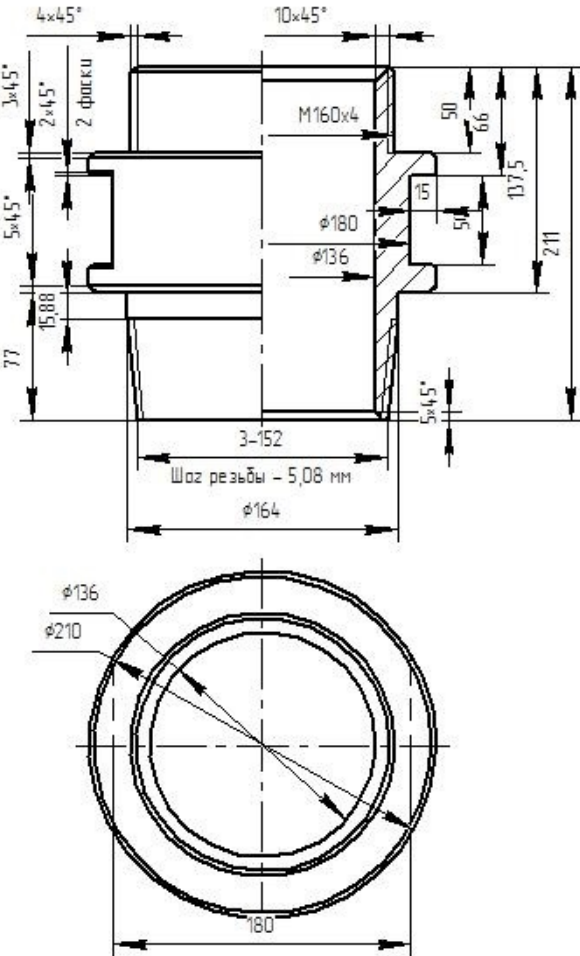
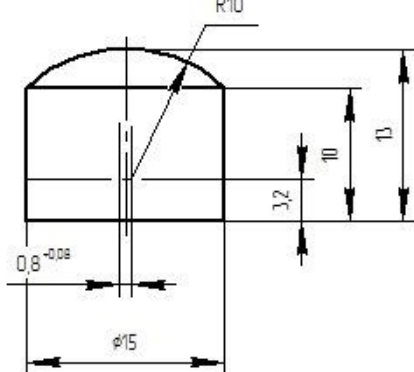
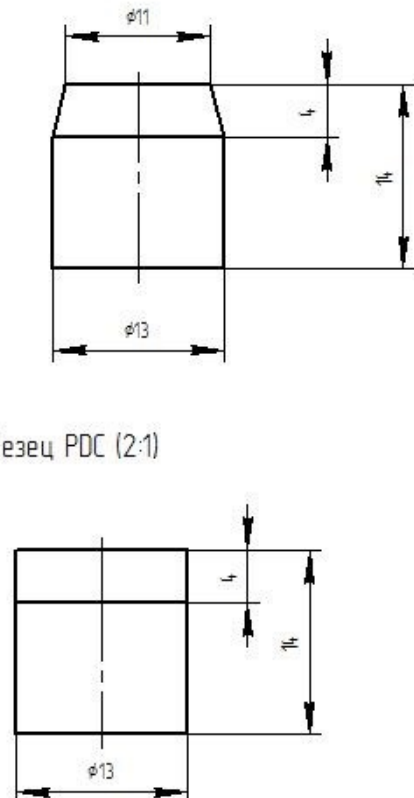
Изм. № подл.	Подп. у дѣла	Взам. инв. №	Изм. № дѣла	Подп. у дѣла
--------------	--------------	--------------	-------------	--------------

Корпус алмазного долота

Копировать

Формат А4

Лист

Перв. примен.					Антивибрационная вставка (2:1)  Защитный резец (2:1)  Резец PDC (2:1) 
Спроб. №					
Взам инв. №	Инв. № дробл.	Подп. и дата			
Подп. и дата					
Инв. № подл.					

Количество резцов:

- резцы PDC - 63 шт.
- антивибрационные вставки - 18 шт.
- защитные резцы - 30 шт.

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	Ниппель и резцы алмазного долота	Лит.	Масса	Масштаб
Разраб.	Мартышова А.А.							1:2
Пров.								
Т.контр.								
Н.контр.								
Утв.								
						Лист Листов 1 НИТУ МИСИС		

Копировал

Формат А4

ПРИЛОЖЕНИЕ Б Документы о практическом использовании результатов



Утверждаю
генеральный директор
ООО «НПЦподземмаш», к.т.н.

Д.Я. Соловых

«21» ноября 2023 г.

Справка

о внедрении результатов диссертационной работы *Мартюшовой Анастасии Алексеевны* на тему: «Повышение ресурса алмазных долот на основе совершенствования технологии их изготовления», представленной на соискание ученой степени кандидата наук

Техническая комиссия в составе: Председатель комиссии – генеральный директор, к.т.н. Соловых Д.Я.; члены комиссии – начальник конструкторского отдела, главный конструктор – Пузыревский В.В., инженер-конструктор Серебренников Н. Е. констатирует, что результаты диссертационной работы Мартюшовой А.А. «Повышение ресурса алмазных долот на основе совершенствования технологии их изготовления» актуальны и имеют большое практическое значение.

Особый интерес представляет предложенная методика определения частных и общих показателей технологичности конструкции алмазного долота, позволяющая обосновать целесообразность изготовления цельнометаллического корпуса и возможность автоматизации процессов сборки ответственных соединений алмазного бурового инструмента. Данная методика может быть также применена для ряда других сборочных узлов горного инструмента и горной техники со схожими конструкторско-технологическими признаками.

Результаты проведенной работы способствуют решению важных научно-практических задач в области совершенствования технологии изготовления горного инструмента с целью технологического обеспечения требуемого качества и должного ресурса на основе предложенных математических моделей точности элементов соединений алмазных долот.

Результаты диссертационной работы Мартюшовой А.А. успешно апробированы и приняты к использованию в ООО «НПЦподземмаш»

Начальник конструкторского отдела,
главный конструктор

Инженер-конструктор



Пузыревский В.В.

Серебренников Н.Е.