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

Мартюшова Анастасия Алексеевна

ПОВЫШЕНИЕ РЕСУРСА АЛМАЗНЫХ ДОЛОТ НА ОСНОВЕ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ИХ ИЗГОТОВЛЕНИЯ

Специальность 2.8.8 – «Геотехнология, горные машины»

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата технических наук

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

Москва, 2023

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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. Протодьяконова. 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., Нескоромных 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 квалитета 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 17^0.

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 КарТУ, 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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе проанализированы особенности конструкции, а также различные технологии изготовления алмазных долот. Выявлена необходимость поиска и разработки эффективных технологий изготовления и сборки элементов конструкции инструмента, способствующих снижению трудоёмкости и себестоимости их производства наряду с повышением эксплуатационных характеристик рабочих поверхностей и ресурса инструмента. Приведена классификация долот, рассмотрена область их применения, выполнен анализ причин выхода из строя алмазного инструмента, представлена характеристика основных повреждений (рис. 1), выполнен анализ конструктивных особенностей PDC- резцов.

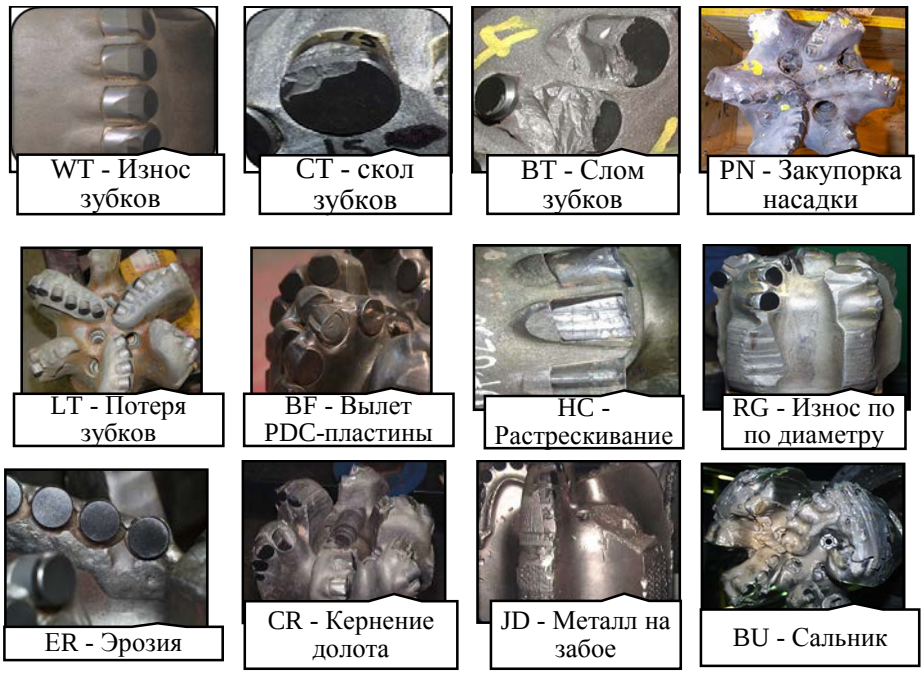


Рисунок 1 – Виды повреждений алмазных долот

На основании аналитического обзора были сформулированы цель и задачи научного исследования, определяющие необходимость совершенствования технологии изготовления долот на основе применения современных методов многокоординатной механической обработки, анализа технологичности конструкции инструмента и селективной сборки ответственных элементов режущей части долота.

Во второй главе выполнен анализ механики процесса резания-скалывания PDC-резцом, выявлены требования точности изготовления алмазных долот, определены основные пути повышения качества бурового инструмента и его ресурса.

Конструкция алмазного долота включает следующие основные элементы: корпус долота, резцы, ниппель (рис. 2).

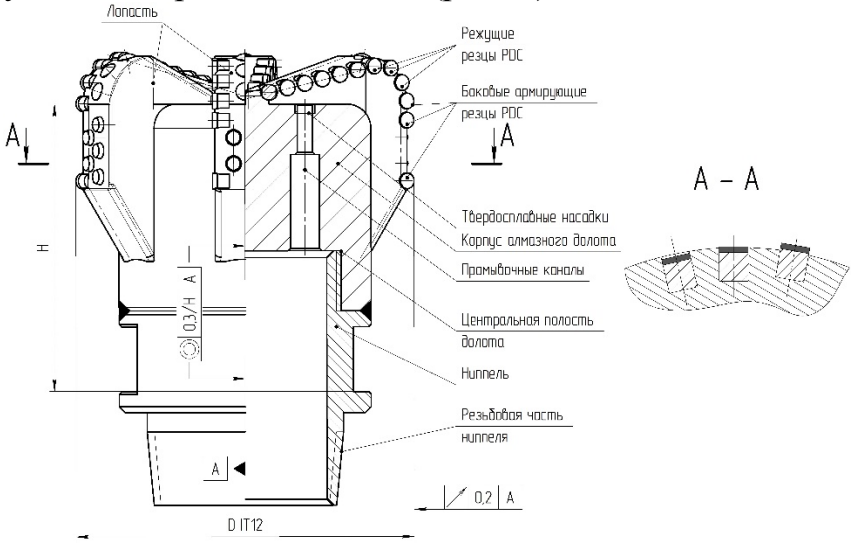


Рисунок 2 – Общий вид алмазного долота и его основные конструктивные элементы

В торцевой части инструмента располагаются рабочие режущие резцы, на цилиндрической образующей – калибрующие. К размерной и позиционной точности резцов предъявляют достаточно жесткие требования, так как от их точной ориентации зависит распределение рабочей нагрузки между резцами одной группы, установленными на разных лопастях. Небольшое угловое расхождение в позиционировании резцов (рис. 3), обусловленное погрешностями механической обработки лунок, может привести к изменению баланса сил резания-скалывания, росту контактных напряжений (рис. 4) и преждевременному выходу из строя резцов.

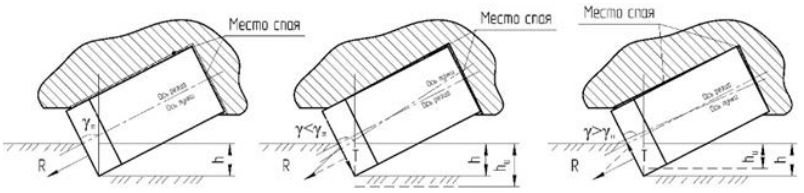
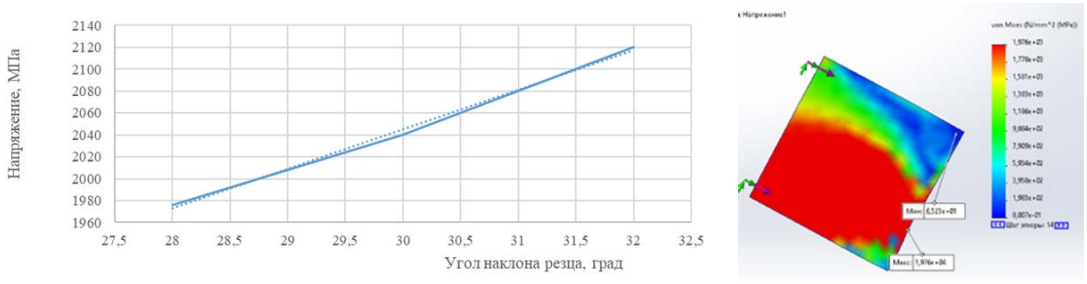


Рисунок 3 - Влияние позиционных отклонений резца на передний угол $\gamma_п$ и баланс сил при бурении



а *б*

Рисунок 4 - Изменение напряжений в алмазной пластине в зависимости от переднего угла $\gamma_п$ при силе резания-скалывания 5кН (*а*), распределение напряжений в алмазном резце при $\gamma_п = 32^0$ (*б*)

Влияние переднего угла $\gamma_п$ на составляющие сил резания-скалывания выражается следующей формулой (1).

$$F_р = P - F_п / tg\gamma_п \qquad (1)$$

где P – осевая нагрузка на резец, Н; $F_п$ – усилие, которое направлено вверх из-за сопротивления среды, воздействующей на переднюю поверхность резца, Н; $\gamma_п$ – передний угол установки резца, град.

Допуск на наружный диаметр долота можно рассматривать как погрешность изготовления ω, которая формируется на протяжении всего технологического цикла производства инструмента и представляет собой сумму погрешностей, возникающих при механической обработке поверхностей корпуса $\omega_{м.о.к}$, механической обработки лопастей $\omega_{м.о.л}$, приваривании лопастей к корпусу $\omega_{св.}$, установке резцов в отверстия лопастей в процессе пайки $\omega_п$ и погрешность установки корпуса в ниппель $\omega_{сб.}$:

$$\omega_б = \omega_{м.о.к} + \omega_{м.о.л} + \omega_{св} + \omega_п + \omega_{сб} \quad (2)$$

Достижение регламентируемых стандартом параметров точности долота возможно при назначении достаточно жестких допусков на межоперационные размеры как на этапах механической обработки, так и сборки соединений. Однако, учитывая структуру базовой технологии, включающей значительное число слесарно-сборочных операций, выполняемых вручную, сварочные операции и высокотемпературную наплавку корпуса, а также низкий уровень автоматизации производства выдержать требуемые допуски не представляется возможным. Поэтому на практике при сборке инструмента часто прибегают к выполнению пригоночных работ, что в целом снижает качество инструмента, и как следствие, его ресурс.

Согласно исследованиям известных ученых-основоположников научной школы технологического обеспечения качества горных машин, – Солода Г.И., Радкевича Я.М., Набатникова Ю.Ф., параметры точности деталей и узлов оказывают существенное влияние на ресурс соединений:

$$\frac{T}{T_{\max}} = \frac{S_{пр} - S}{S_{пр} - S_{\min}} < 1 \quad (3)$$

где T *и* T_{max} – соответственно, фактический и максимальный ресурс соединения, $S_{пр}$ – предельный зазор, S_{min} – минимальный допустимый зазор в соединении, S – зазор, получаемый при сборке соединения.

Таким образом, ресурс изделия зависит от уровня качества изготовления K, определяемого выражением:

$$K = 1 - \left(\frac{S - S_{\min}}{ITS + \Delta}\right)^2 = 1 - \frac{(S - S_{\min})^2}{(1{,}05ITS)^2} \quad (4)$$

где ITS – допуск на зазор в соединении.

Уровень качества тем выше, чем ближе, полученный при сборке зазор S к минимально допустимому зазору S_{min}, соответствующему функциональному назначению соединения. При уровне качества соединения K=1 зазор в соединении равен S=S_{min}, а отношение T/T_{max}=1.

Диаметральный допуск долота ограничивает отклонения, порождаемые действием ряда факторов:

- отклонение от соосности цилиндрической поверхности корпуса с осью базовой резьбы, обусловленное наличием зазора в базовой резьбе;
- радиальное биение, обусловленное разновысотностью резцов калибрующей части инструмента.

Таким образом, для исключения вероятности получения нерегламентированных отклонений при изготовлении инструмента необходимо стремиться к уменьшению зазора в резьбовом соединении и уменьшению радиального биения резцов калибрующей части.

С целью снижения погрешностей обработки на разных этапах изготовления долота в диссертации предлагаются различные варианты решения этой актуальной задачи – замена сварной конструкции корпуса на

цельнометаллическую с применением многокоординатной обработки на станках с ЧПУ, а также использование принципов групповой взаимозаменяемости при сборке соединений корпус-ниппель и резец-корпус, обеспечивающих высокую точность.

В третьей главе диссертации рассмотрены вопросы технологического обеспечения качества изготовления алмазного долота, дано обоснование конструкции цельнометаллического корпуса на основе анализа и расчета частных и комплексных показателей технологичности конструкции долота.

За последнее десятилетие большую популярность приобрела концепция проектирования изделий DFMA (Design for Manufacture and Assembly). В соответствии с основными принципами методики DFMA число деталей в сборочной единице должно быть рациональны 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:

$$DFA = \left(\frac{3NM}{TM}\right)100\%, \qquad (5)$$

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.

Принимая во внимание современный уровень развития металлообработки, технологические возможности применяемого оборудования, а также уровень автоматизации машиностроительного производства, предложено заменить сварную конструкцию корпуса долота на цельную и разработать рациональный технологический процесс его изготовления с применением средств автоматизации на этапах механообработки и сборки готового изделия. Модернизированная технология позволяет уменьшить составляющие погрешности обработки, благодаря исключению сварочных операций и совместной обработки корпуса с лопастями:

Для оценки целесообразности предложенного решения в работе выполнен количественный анализ показателей технологичности конструкции изделия (ТКИ) с монолитным корпусом. С этой целью определялся комплексный показатель технологичности конструкции долота с учетом весового вклада принятых частных показателей технологичности K_i:

$$K_\Sigma = \frac{\sum_{i=1}^{n} K_i K_{э.э\ i}}{\sum_{i=1}^{n} K_{э.э\ i}} = \frac{K_1 K_{э.э\ 1} + K_2 K_{э.э\ 2} + \cdots + K_n K_{э.э\ n}}{K_{э.э\ 1} + K_{э.э\ 2} + \cdots + K_{э.э\ n}}, \qquad (6)$$

где K_Σ - комплексный показатель технологичности (О < K_Σ < 1); K_i - частный показатель технологичности; $K_{э.э\ i}$ - коэффициент экономической эквивалентности i-го частного показателя (0 < $K_{э.э\ i}$ < 1).

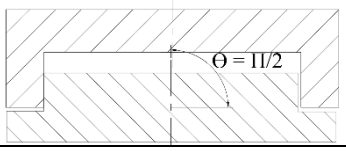
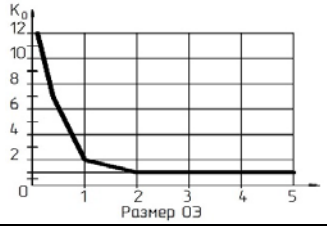
Наряду с изменением конструкции долота и технологии механообработки в работе предлагается также замена ручной сборки элементов «корпус-ниппель» на автоматическую. С целью оценки

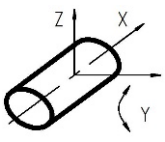
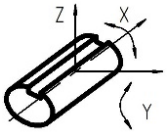
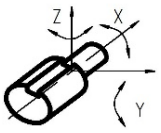
приспособленности усовершенствованной конструкции долота к безлюдной сборке, предложена методика многоуровневой оценки ТКИ для условий автоматической сборки. Для этого определяются показатели технологичности, приведенные в табл.1.

Автоматизацию процесса сборки с высоким уровнем безотказности и минимальными вложениями можно осуществить, если в результате расчета комплексный коэффициент технологичности детали $К_{т.д.р}$ равен или больше нормативного $К_{т.н}$.

Результаты расчета частных и комплексных коэффициентов технологичности приведены в табл. 2.

Таблица 1 – Частные показатели технологичности конструкции долота

Коэффициент сцепляемости:  Возможный поворот детали	$К_{сц} = 1 - (\Theta + \rho)/\pi$, где ρ = *arctg (f)*, где *f* – коэффициент трения
Коэффициент сложности ориентации:	$К_{со} = 1/К_{о}$, $К_{о}$ – коэффициент стоимости.
Коэффициенты $К_{о}$ и $К_{со}$ зависят от размеров ориентирующего элемента: Размер ОЭ = (d_2 - d_1) / 2, где d_1 и d_2 – max и min диаметр захватываемой детали. На рисунке определена зависимость размера ориентирующего устройства от стоимости.  Влияние размера ОЭ на стоимость ориентирующего устройства	
Коэффициент устойчивости зависит от габаритных размеров подаваемой детали: При -D/L = 1/10…1/3 - Устойчивость мала	$К_{ус} = \frac{arctg(D/L)}{\pi/4}$ - D/L>3 – Устойчивость высока
Коэффициент симметричности:	$К_{см} = 1/n_{с.о}$, $n_{с.о}$ - число ступеней ориентации
Выявление коэффициента $К_{см}$ осуществляется правильной ориентацией присоединяемой детали:	

Поворот относительно оси У  $n_{с.о} = 1$, $К_{см} = 1$	Два поворота: относительно осей X и У  $n_{с.о} = 2$, $К_{см} = 0,5$	Три поворота: относительно осей X, У, Z  $n_{с.о} = 3$, $К_{см} = 0,33$

Продолжение таблицы 1

Нормативные коэффициенты и коэффициенты экономической эквивалентности для деталей, загруженных в магазин-накопитель (загрузочное устройство)							
$К_{сц}$	$К_{сц.э.э}$	$К_{со}$	$К_{со.э.э}$	$К_{ус}$	$К_{ус.э.э}$	$К_{см}$	$К_{см.э.э}$
0,8	0,4	0,2	0,2	-	-	0,25	0,4
Комплексный показатель технологичности конструкции детали: $$К_{т.д} = \frac{(К_{сц} \cdot К_{сц\,э.э} + К_{со} \cdot К_{со\,э.э} + К_{ус} \cdot К_{ус\,э.э} + К_{см} \cdot К_{см\,э.э}}{К_{сц\,э.э} + К_{со\,э.э} + К_{ус\,э.э} + К_{см\,э.э}}$$							

Таблица 2 – Результаты расчетов показателей технологичности

Соединение	$К_{сц}$	$К_{со}$	$К_{ус}$	$К_{см}$	$К_{т.д.р}$	$К_{т.л.н}$
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 инструмента нерациональна и невозможна, так как требует взаимной ориентации большого числа элементов и создания специального сборочного оборудования.

Для обработки рекомендованного сложнопрофильного цельнометаллического корпуса долота предложено использовать современные высокопроизводительные четырех- и пятиосевые станки и обрабатывающие центры (ОЦ) с ЧПУ. В работе разработана модернизированная технология изготовления корпуса долота с минимальным числом технологических операций и установов, позволяющая снизить трудоемкость изготовления долота на 28…32% за счет замены сварной конструкции на монолитную.

Для обеспечения высокой точности обработки поверхностей корпуса выявлены и проанализированы позиционные связи элементов технологический системы токарного и фрезерного станков с ЧПУ (рис. 5).

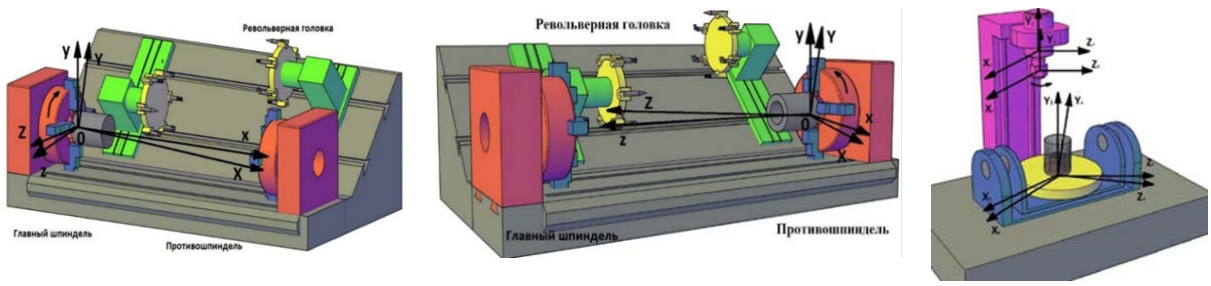


Рисунок 5 – Позиционные связи и координатные системы токарного и фрезерного станков с ЧПУ

Представлено математическое описание позиционной точности обрабатываемых поверхностей в координатной системе станков, благодаря чему удалось получить выражения для оценки погрешности установки заготовки и ее влияние на формируемую геометрическую точность обрабатываемых поверхностей.

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 реализованы принципы единства и постоянства баз, благодаря чему, погрешность установки была сведена к минимуму.

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

Нормальные координаты - это отклонения от перпендикулярности точек соединения в направлении к базирующим поверхностям. В данном случае для выбранной схемы базирования с использованием двойной опорной базы: установочные нормальные координаты – Δz_1, Δz_2, Δz_3; координаты двойной опорной – Δx_4, Δy_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:

$$T = (\Delta z_1, \Delta z_2, \Delta z_3, \Delta x_4, \Delta y_5, \Delta x_6) \tag{7}$$

Погрешность установки ниппеля с учетом вектора ω_y:

$$\omega_y = Q \cdot T \tag{8}$$

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

$$Q = \begin{Vmatrix} 0 & 0 & 0 & q_{14} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & q_{25} & 0 \\ q_{31} & q_{32} & q_{33} & 0 & 0 & 0 \\ q_{41} & q_{42} & q_{43} & 0 & 0 & 0 \\ q_{51} & q_{52} & q_{53} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & q_{66} \end{Vmatrix} \tag{9}$$

Элементы q_{31} … q_{53}. напрямую относятся к установочной базе и определяются как:

$$q_{31} = (x_2y_2 - x_3y_2) / C \qquad q_{32} = (x_3y_1 - x_1y_3) / C \qquad q_{33} = (x_1y_2 - x_2y_1) / C$$
$$q_{41} = (x_3 - x_2) / C \qquad q_{42} = (x_1 - x_3) / C \qquad q_{43} = (x_2 - x_1) / C$$
$$q_{51} = (y_3 - y_2) / C \qquad q_{52} = (y_1 - y_3) / C \qquad q_{33} = (y_2 - y_1) / C$$

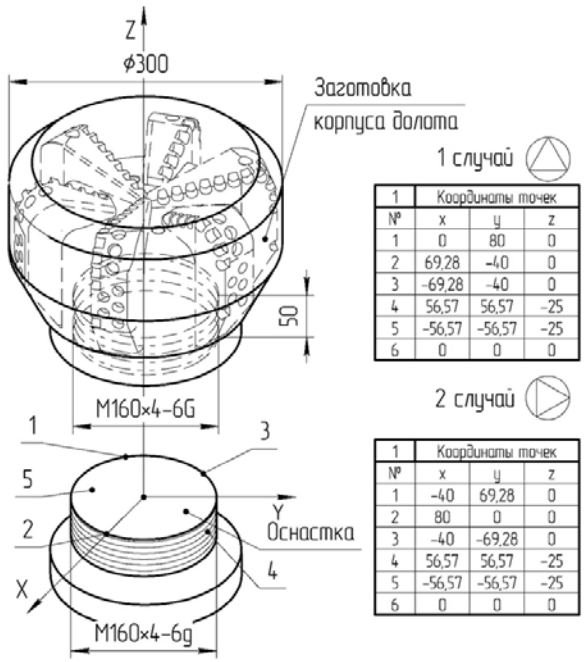
$$\text{где } C = \begin{vmatrix} 1 & y_1 & -x_1 \\ 1 & y_2 & -x_2 \\ 1 & y_3 & -x_3 \end{vmatrix}. \tag{10}$$

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. 6.

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.



1	Координаты точек		
№	x	y	z
1	0	80	0
2	69,28	-40	0
3	-69,28	-40	0
4	56,57	56,57	-25
5	-56,57	-56,57	-25
6	0	0	0

1	Координаты точек		
№	x	y	z
1	-40	69,28	0
2	80	0	0
3	-40	-69,28	0
4	56,57	56,57	-25
5	-56,57	-56,57	-25
6	0	0	0

Рисунок 6 – Координаты опорных точек базирования

Расчетные плановые и нормальные координаты представлены в табл. 3.

Таблица 3 – Результаты расчетов

	q_{31}	q_{32}	q_{33}	q_{41}	q_{42}	q_{43}	q_{51}	q_{52}	q_{53}	q_{66}	C
1 сл.	0	0,333	-0,333	0,008	-0,004	-0,004	0	-0,007	0,007	0,006	-16627
2 сл.	0	0	-0,4	0,009	0	-0,009	0,005	-0,01	0,005	0,006	-20241

Погрешность установки ω_y

1 случай:

$$\begin{Vmatrix} a_y \\ b_y \\ c_y \\ \lambda_y \\ \beta_y \\ \gamma_y \end{Vmatrix} = \begin{Vmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0,333 & -0,333 & 0 & 0 & 0 \\ 0,008 & -0,004 & 0,004 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -0,007 & 0,007 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,006 \end{Vmatrix} \cdot \begin{Vmatrix} 0,46 \\ 0,23 \\ 0,02 \\ 0,125 \\ 0,25 \\ 0 \end{Vmatrix} = \begin{Vmatrix} 0,125 \\ 0,25 \\ 0,069 \\ 0,003 \\ -0,001 \\ 0 \end{Vmatrix}$$

Продолжение таблицы 3

2 случай:

$$\begin{Vmatrix} a_y \\ b_y \\ c_y \\ \lambda_y \\ \beta_y \\ \gamma_y \end{Vmatrix} = \begin{Vmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -0{,}4 & 0 & 0 & 0 \\ 0{,}009 & 0 & -0{,}009 & 0 & 0 & 0 \\ 0{,}005 & -0{,}01 & 0{,}005 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0{,}006 \end{Vmatrix} \cdot \begin{Vmatrix} 0{,}4 \\ 0{,}12 \\ 0{,}01 \\ 0{,}003 \\ 0{,}2 \\ 0 \end{Vmatrix} = \begin{Vmatrix} 0{,}003 \\ 0{,}2 \\ -0{,}004 \\ 0{,}003 \\ 0 \\ 0 \end{Vmatrix}$$

Таким образом, на основе математического описания формируемой погрешности обработки корпуса установлено, что для достижения требуемых параметров точности на этапе сборки долота элементы корпуса должны быть обработаны с точностью не ниже 10-го квалитета.

Четвертая глава диссертационной работы посвящена обоснованию целесообразности применения средств автоматизации для сборки соединения «корпус долота-ниппель» с целью повышения точности сборки и снижения трудоемкости выполняемых операций, а также вопросам достижения точности сборки соединений долота.

Для возможности реализации автоматической сборки соединения корпус-ниппель дано обоснования параметров точности позиционирования собираемых элементов для обеспечения требуемой соосности корпуса и ниппеля методом полной взаимозаменяемости. Выявлены пространственные позиционные связи сопрягаемых поверхностей корпуса и ниппеля соответственно, как базовой и присоединяемой деталей, на основании чего при помощи аналитических методов теории баз обоснованы требования геометрической точности элементов соединений, принятых в качестве конструкторских баз.

Для решения поставленной задачи определены составляющие погрешности установки ω_y ниппеля в корпус алмазного долота (табл. 4). Для этого был принят к рассмотрению вектор $\omega_y = (a_y, b_y, c_y, \lambda_y, \beta_y, \gamma_y)$, где составляющие погрешности установки a_y, b_y, c_y и λ_y, β_y, γ_y характеризуют параметры смещения и поворота координатных осей корпуса и ниппеля.

Отклонение от соосности ниппеля и корпуса характеризуют параметры ε_x, ε_y, ε_z, выступающие в качестве приведенной погрешности установки соединения при выбранной схеме базирования - с использованием двойной опорной базы (рис. 7)

Все расчетные значения параметров и коэффициентов сведены в табл. 5.

В соответствии с техническими требованиями на сборку алмазных долот, допуск соосности ниппеля и корпуса для долота ∅130 мм составляет 0,3/200 мм, а для долота ∅295,3 – 0,5/300 мм.

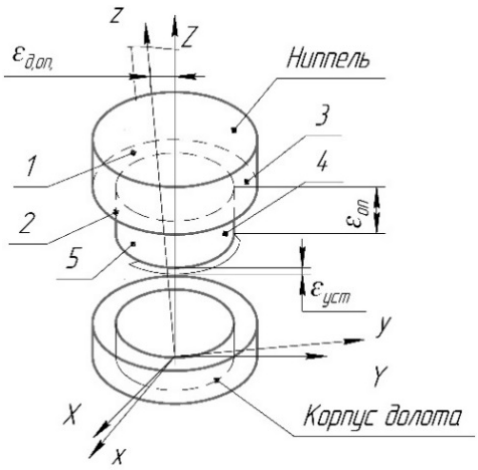


Рисунок 7 – Формирование отклонения от соосности при соединении корпуса и ниппеля

Таблица 4 – Параметры погрешности установки ω_y

Отклонения размера установки, формируемые в направлении принятых конструкторских баз, составляют:	
в направлении оси *X* в направлении оси *Y* где (уст) – установочная, (д.оп) – двойная опорная, (оп) – опорная; *x* и *y* = $d_{ср\ резьбы}$.	$\varepsilon^{(д.оп)}_x = a^{(д.оп)}_y + \beta^{(уст)}_y \cdot z + \gamma^{(оп)}_y \cdot y,$ $\varepsilon^{(д.оп)}_y = b^{(д.оп)}_y + \lambda^{(уст)}_y \cdot z + \gamma^{(оп)}_y \cdot x,$
Параметр смещения $c^{(уст)}_y$, формируемый на установочной базе	$c^{(уст)}_y = 0{,}5 \cdot h$
Погрешность формы *h* (ГОСТ 24643-81) с учетом допуска на размер между поверхностями соединения и уровня относительной геометрической точности А, В, С где *k* – коэффициент, определяющий соотношение *h / IT;* *IT* – допуск на высоту головки корпуса	$h = k \cdot IT,$
Параметр относительного поворота $\lambda^{(уст)}_y$ и $\beta^{(уст)}_y$ где L_y и L_x – расстояния между опорными элементами установочной базы в направлении осей *Y* и *X*.	$\lambda^{(уст)}_y = h / (4 \cdot L_y)$ $\beta^{(уст)}_y = h / (4 \cdot L_x)$
Составляющие погрешности установки $a^{(д.оп)}_y$, $b^{(д.оп)}_y$ $\Delta^{в}_{D1}$, $\Delta^{н}_{dср}$ – предельные отклонения размеров метрической резьбы по среднему и наружному диаметру.	$a^{(д.оп)}_y = b^{(д.оп)}_y = 0{,}25 \cdot (\Delta^{в}_{D1} - \Delta^{н}_{d}$
Соосность ε ниппеля и корпуса определяется как результат смещения осей в двух координатных направлениях $\varepsilon^{(д.оп)}_x$ и $\varepsilon^{(д.оп)}_y$	$\varepsilon = \sqrt{\varepsilon_x^{(д.оп)^2} + \varepsilon_y^{(д.оп)^2}}$

Таблица 5 - 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			$0{,}19 = \sqrt{0{,}138^2 + 0{,}125^2} = 0{,}186$							

Таким образом, использование аналитических методов теории баз, позволяет точно определить составляющие погрешности установки и оценить их влияние на позиционную точность деталей соединения, что имеет важное значение для организации автоматической сборки соединений.

Также определены условия собираемости ниппеля с корпусом алмазного долота при автоматической сборке соединения, что создает предпосылки для разработки автоматической сборочной операции.

Для ниппеля и отверстия корпуса долота, представленных как вал и отверстие соответственно, предложены выражения, позволяющие рассчитать численные значения отклонений центра вала относительно центра отверстия, возникающих в результате смещений вала в направлении двух координатных осей. Таким образом, определены условия автоматической собираемости ниппеля с корпусом с учетом параметров относительного положения и движения сопрягаемых деталей (табл.6).

Таблица 6 – Условия соединения «ниппель-корпус»

Вектор положения	Вектор перемещений	Вектор резьбового соединения
$\Delta_k = (\Delta_x, \Delta_y, \Delta_z, \Delta_\lambda, \Delta_\beta, \Delta_\gamma)$	$\eta = (a, b, c, \lambda, \beta, \gamma)$	$\eta = (\Delta a, \Delta b, c, \Delta\lambda, \Delta\beta, \gamma)$

Для автоматического соединения ниппеля с корпусом необходимо выполнение следующего условия (рис.8):

$$\Delta_c + \Delta_П \le 0{,}5 \cdot S_{нм}, \qquad (11)$$

где $S_{нм}$ – наименьший зазор, равный $S_{нм} = D_о - d_в$,

Δ_c и $\Delta_П$ - отклонения центра вала, обусловленные его линейными смещениями и поворотами относительно отверстия, определяемые выражениями:

$$\Delta_c = \sqrt{\Delta_x^2 + \Delta_y^2} = \Delta_{x,y}\sqrt{2}; \quad (12) \qquad \Delta_П = Z \cdot \Delta_\phi = Z\sqrt{\Delta_\lambda^2 + \Delta_\beta^2} = Z \cdot \Delta_{\lambda,\beta}\sqrt{2}, \quad (13)$$

в которых Δ_x, Δ_y и Δ_λ, Δ_β позиционные отклонения вдоль и вокруг координатных осей $o_o x_o$ и $o_o y_o$;

.

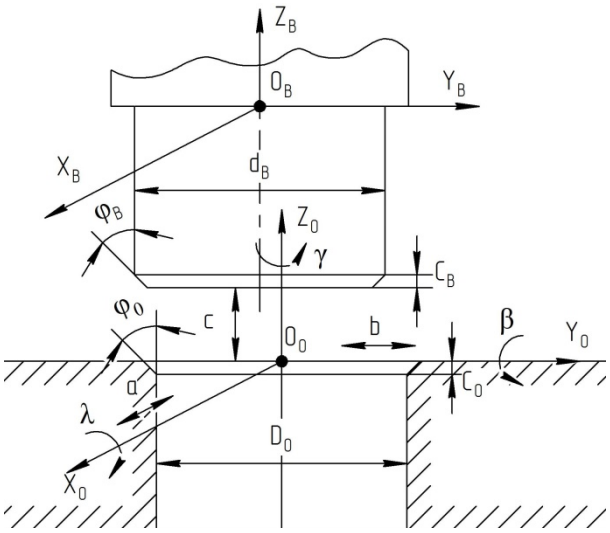


Рисунок 8 - Установка ниппеля в отверстие корпуса

После соответствующих преобразований условие собираемости примет вид:

$$\sqrt{\Delta_x^2 + \Delta_y^2} + Z\sqrt{\Delta_\lambda^2 + \Delta_\beta^2} \le S_{нм} \qquad (14)$$

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

$$\sqrt{2}\cdot\left(\Delta_{x,y} + Z\cdot\Delta_{\lambda,\beta}\right) \le 0{,}5\cdot S_{нм} \qquad (15)$$

$$\text{или} \quad (\Delta_{x\,y} + Z\cdot\Delta_{\lambda\,\beta}) \le 0{,}35\cdot S_{нм} \qquad (16)$$

Тогда при $\Delta_{x\,y} = Z\cdot\Delta_{\lambda\,\beta}$, требования позиционной точности ниппеля относительно корпуса:

$$\pm\Delta_x = 0{,}17\cdot S_{нм}; \qquad (17) \qquad \pm\Delta_y = 0{,}17\cdot S_{нм}; \qquad (18)$$

$$\pm\Delta_\lambda = 0{,}17\cdot S_{нм} / Z; \qquad (19) \qquad \pm\Delta_\beta = 0{,}17\cdot S_{нм} / Z \qquad (20)$$

Тонкая саморегулировка при помощи фасок на сопрягаемых поверхностях соединяемых деталей обеспечивает пассивную адаптацию при автоматической сборке. Расширение условий собираемости в данном случае адекватно увеличению зазора $S_{нм}$ на величину:

$$P = C_o\cdot tg\varphi_o + C_в\cdot tg\varphi_в, \qquad (21)$$

где C_o, $C_в$ и φ_o, $\varphi_в$ соответственно ширина и углы наклона фасок в отверстии корпуса и на торце ниппеля.

С учетом расширения условие собираемости принимает вид:

$$\sqrt{\Delta_x^2 + \Delta_y^2} + Z\sqrt{\Delta_\lambda^2 + \Delta_\beta^2} \le S_{нм} + C_o\cdot tg\varphi_o + C_в\cdot tg\varphi_в \qquad (22)$$

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

линейные $\pm\Delta_x = 0{,}17\,(S_{нм} + P)$, (23); $\pm\Delta_y = 0{,}17(S_{нм} + P)$, (24);

угловые $\pm\Delta_\lambda = 0{,}17(S_{нм} + P) / Z$, (25); $\pm\Delta_\beta = 0{,}17(S_{нм} + P)/ Z$, (26).

Эти линейные и угловые параметры являются исходными данными для определения позиционной точности исполнительных звеньев используемых средств автоматизации. Результаты расчета представлены в табл. 7.

Таблица 7 - Результаты расчета

Исходные данные:			
Соединение	M160x4-6*G*/6g	Угол фасок	45°
Зазор S, мм	0,12…0,705	$tg\varphi_0 = tg\varphi_в$	1
Мин.зазор $S_{нм}$, мм	0,12	Высота Z, мм	50
Параметры точности положения ниппеля при ширине фаски равной 3 мм			
Расширение условия собираемости		$P = 3 \cdot tg\varphi_0 + 3 \cdot tg\varphi_в = 6$ мм	
Линейные, мм	$\pm \Delta_x = \pm \Delta_y = 0{,}17(S_{нм} + 6) = 1{,}04$		
Угловые	$\pm \Delta_\lambda = \pm \Delta_\beta = 0{,}17(S_{нм} + 6) / 50 = 0{,}2$		12°
Параметры точности положения ниппеля при ширине фаски равной 4 мм			
Линейные, мм	$\pm \Delta_x = \pm \Delta_y = 0{,}17(S_{нм} + 8) = 1{,}38$		
Угловые	$\pm \Delta_\lambda = \pm \Delta_\beta = 0{,}17(S_{нм} + 8) / 50 = 0{,}3$		17°

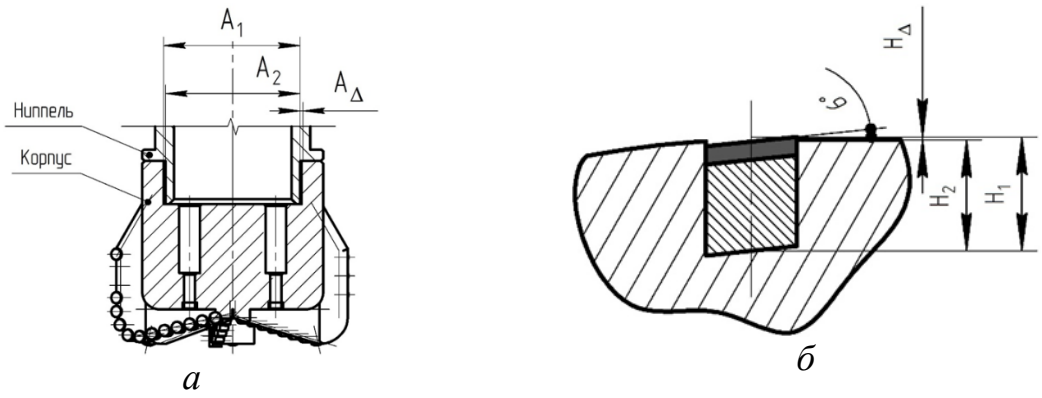
Таким образом, при увеличении правильно рассчитанных размеров фасок, происходит расширение условий собираемости рассматриваемого соединения, что обеспечивает качественную сборку при автоматической установке ниппеля в корпус.

Отмечены основные причины и факторы, сдерживающие автоматизацию процесса сборки на предприятиях горного машиностроения, в том числе и при производстве горного инструмента.

Для достижения высоких параметров точности резьбового соединения корпус-ниппель и соединения резец-корпус предложено использовать принципы селективной сборки, что позволило:

- уменьшить допуск на зазор *ITS* в резьбовом соединении с 0,7мм до 0,35 мм и 0,15 мм, соответственно для двух и четырех групп сортировки деталей;
- уменьшить допуск радиального биения резцов T_R с 0,14 мм, получаемого методом полной взаимозаменяемости, до 0,08 мм при реализации групповой взаимозаменяемости.

Схемы размерных цепей представлены на рис. 9, а результаты размерного анализа приведены в таблицах 8, 9.



а *б*

Рисунок 9 – Размерные цепи в соединениях корпус-ниппель *(а)* и резец-корпус (*б*)

Таблица 8 – Результаты расчета для резьбового соединения корпус-ниппель при 4-х группах сортировки деталей

	Корпус $\vec{A}_1$		Ниппель $\vec{A}_2$		Зазор A_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

Таблица 9 – Результаты расчета для соединения резец-корпус при 2-х группах сортировки деталей

	Высота зубков $\vec{H}_1$		Глубина отверстий $\vec{H}_2$		Вылет зубков H_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	- 0,04	0	- 0,04	0	- 0,04	0,04
Группа II	0	0,04	0	0,04	- 0,04	0,04

Таким образом, использование принципов групповой взаимозаменяемости при сборке ответственных соединений алмазного долота позволяет уменьшить допуск на зазор *ITS* в резьбовом соединении и радиальное биение резцов калибрующей части, что обеспечивает повышение уровня качества *К* соединений до 0,94..0,98, а эксплуатационный ресурс долота *Т* в среднем до 0,95 от максимально возможного, равного 1.

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 $К_{т.д.р}$=1,37 и $К_{т.д.н.}$=0,46 выполняется основное условие приспособленности конструкции к автоматизированной сборке $К_{т.д.р.} > К_{т.д.н.}$.
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 $0…0^0 42'$, 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 17^0.

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.

Основные положение диссертации опубликованы в следующих изданиях:

Статьи в изданиях, рекомендованных ВАК при Минобрнауки РФ

1. 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

2. 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

3. 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.

Публикации в других изданиях

4. 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.

5. 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.

6. 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.