



## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
Глава 1 Анализ известных технических решений .....	5
Глава 2 Расчет основных технологических показателей электрохимической обработки.....	48
Глава 3 Разработка узла вращения осевого инструмента.....	65
Глава 4 Разработка технических решений, обеспечивающих расширение технологических возможностей станка.....	76
Глава 5 Разработка циклограммы.....	96
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	98
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....	99

## ВВЕДЕНИЕ

Совершенствование традиционных технологий (монотехнологий) механической обработки материалов во многом исчерпало резервы повышения эффективности обработки. Отечественные и зарубежные исследователи склоняются к выводу, что для резкого повышения производительности и снижения себестоимости обработки реальной альтернативой традиционным технологиям являются комбинированные гибридные технологии, реализуемые путём управляемого воздействия на инструмент, заготовку и/или технологическую среду дополнительных концентрированных потоков энергии – механической, тепловой, электрической, акустической, электромагнитной, химической и др. Характер этого воздействия различен для каждого из технологических процессов и в настоящее время всесторонне изучается как у нас в стране, так и за рубежом. Преимуществом комбинированных технологий является то, что суммарный эффект воздействия на обрабатываемый материал и зону обработки не равен сумме элементарных эффектов от воздействия инструмента и дополнительного источника энергии, а превосходит её, причем иногда многократно.

Комбинированная технология с введением в технологическую зону дополнительной энергии охватывает большую группу технологических процессов - обработку резанием (точение, фрезерование, сверление и др.), шлифование, правка шлифовальных кругов, выглаживание, полирование, модификация поверхности и др.

В процессе обработки эффекты и явления, вызываемые воздействием дополнительной энергии, приводят к временному снижению прочности обрабатываемого материала, изменению условий контактного взаимодействия заготовки и инструмента и др. Результатом дополнительного энергетического воздействия на обрабатываемый материал может быть диспергирование поверхностных слоёв вплоть до возникновения наноструктур и аморфизации поверхности, что при правильном назначении режимов обработки приводит к

многократному повышению износостойкости деталей машин, долговечности и усталостной прочности обрабатываемых изделий, но в то же время требует изучения особенностей трансформации свойств поверхностного слоя обрабатываемых материалов.

Ещё одним путём повышения производительности токарных станков с ЧПУ является расширение его технологических возможностей, а именно возможность многосторонней и многоинструментальной обработки детали. Возникают два пути развития данного направления модернизации. Первый путь это модернизация текущего оснащения.

Наиболее выгодным решением является оснащение станка дополнительными модулями, а не модернизация старых модулей. Это позволяет повысить производительность и значительно уменьшить сроки окупаемости.

Цель – расширить технологические возможности станка путём совершенствования его технологического оснащения.

Задачи:

1) Рассчитать и спроектировать привод инструментального блока. Привод должен иметь компактные размеры, а также его конструкция должна обеспечивать быстрое закрепление хвостовика и передачу крутящего момента.

2) Рассчитать и спроектировать узел вращения осевого инструмента. Оправка должна иметь компактные размеры и при этом выдерживать требуемые нагрузки.

3) Разработать технические решения, обеспечивающие расширение технологических возможностей станка, а именно фрезерование шпоночных пазов, сверление и нарезание резьб в отверстиях несоосных оси станка.

4) Разработать дополнительный сменный модуль ультразвуковой обработки

# Глава 1 Анализ известных технических решений

## 1.1 Описание станка 16Б16Т1С1

Операцию нарезания резьбы в станке 16Б16Т1С1 возможно осуществлять только вдоль оси заготовки. Нарезание резьбы показанной на рисунке 1.1. невозможно, так как инструмент метчик, закреплённый в задней бабке может двигаться только вдоль оси. Поэтому, после токарной обработки на данном станке для нарезания подобных резьб следует отправлять деталь на другой станок, что значительно повышает время, затраченное на изготовление детали.

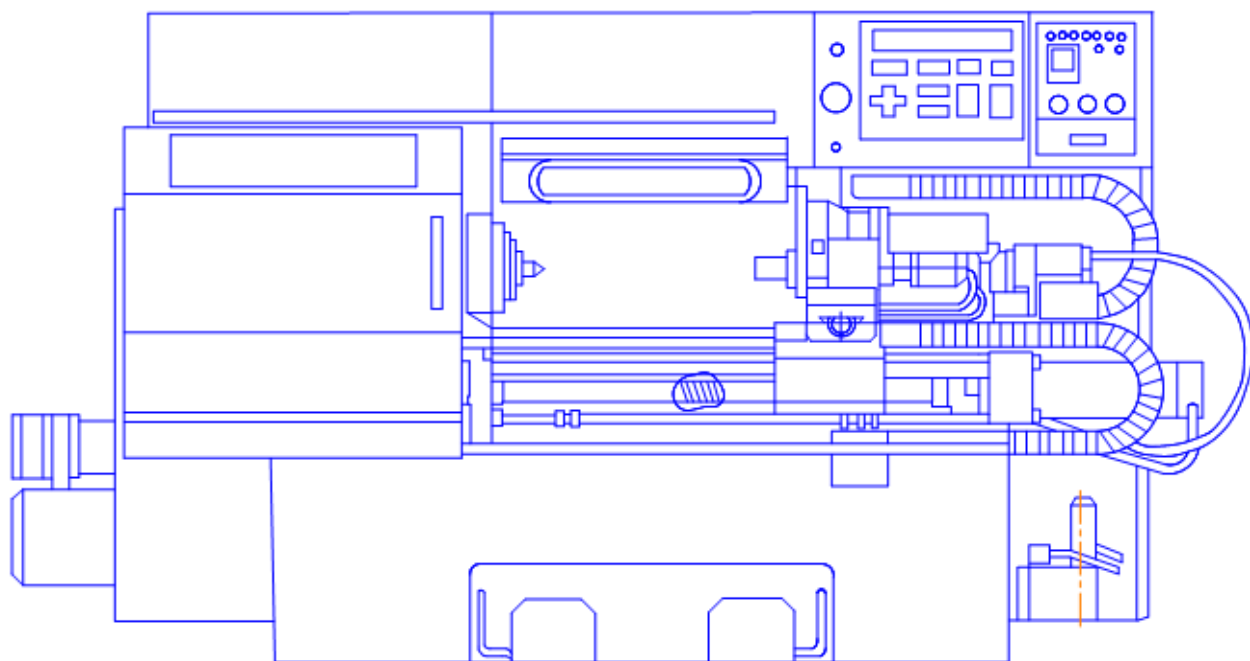


Рисунок 1.1 - Станок 16Б16Т1С1

На многих деталях типа вал фрезеруется шпоночный пазы, показанные на рисунке 1.2. Такой вид обработки также предоставляется невозможным на станке 16Б16Т1С1.

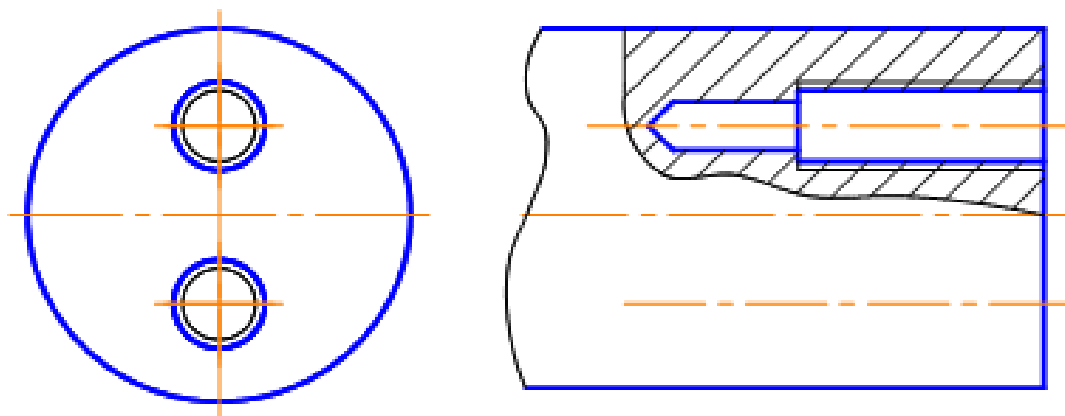


Рисунок 1.2 - Вал с резьбовыми отверстиями

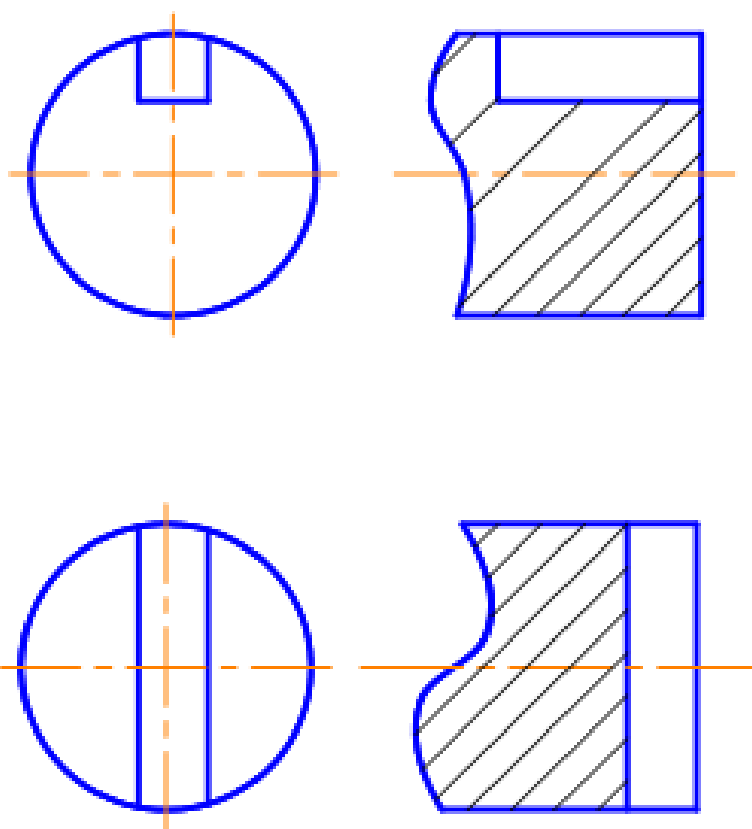


Рисунок 1.3 - Два варианта шпоночных пазов на детали типа вал

## 1.2 Литературный обзор

### Анализ состояния и перспектив развития комбинированных технологий

На современном этапе научно-технического прогресса прочность, вязкость, твердость и другие характеристики металлических и керамических конструкционных материалов возрастают так быстро, что инструментальные материалы, которыми сегодня располагает производство, в целом ряде случаев не позволяют осуществлять высокопроизводительную обработку заготовок. К тому же резание часто приходится вести в экстремальных условиях - по корке, по высокопрочным наплавкам, при больших сечениях среза и т.п., что усугубляет технологические трудности. Конечно, резание само по себе еще не исчерпало всех резервов повышения производительности и качества обработки - продолжают совершенствоваться известные и синтезироваться новые инструментальные материалы, продолжают совершенствоваться известные и разрабатываться новые конструкции режущих инструментов, создаются принципиально новые и модернизируются старые станки, позволяющие реализовывать новые высокопроизводительные схемы обработки, совершенствуется технологическая оснастка, разрабатываются принципиально новые схемы обработки, позволяющие управлять качеством поверхностного слоя деталей, в том числе на уровне наноструктур. Но и этих мер уже часто становится недостаточно, чтобы удовлетворить все возрастающие требования к производительности и качеству обработки. Возникает необходимость искать новые пути решения этих задач. В связи с этими особенностями современного производства в обработке металлических и керамических материалов, наряду с другими методами интенсификации технологических операций развивается направление по повышению эффективности механической обработки путем временного снижения прочности обрабатываемого материала и изменения механизма контактных процессов, протекающих на рабочих поверхностях инструментов и в приконтактном поверхностном слое обрабатываемых заготовок. Такое влияние на обрабатываемый материал и контактные явления

достигается комбинированием механической энергии процессов резания с другими видами энергии - тепловой, электрической, химической, ультразвуковой, электромагнитной и др. Введение в зону обработки концентрированных потоков дополнительной энергии облегчает проведение процесса резания. Данное направление получило название комбинированных, или гибридных, технологий механической обработки [22]. Такие технологии позволяют существенно повысить производительность механической обработки при сохранении заданного качества обработки и высокой стойкости инструмента.

Среди комбинированных технологий механической обработки в последнее время развиваются такие высокоэффективные методы как лазерная, плазменная обработка, вибрационное резание, электромеханические и химикомеханические методы обработки, комбинация обработки резанием с поверхностным пластическим деформированием, обработка резанием с применением потоков дополнительной энергии ультразвуковых колебаний.

Высокая эффективность гибридных технологий, при которых технологическая зона одновременно обрабатывается несколькими источниками воздействия, обусловлена синергетическими эффектами от одновременного введения в обрабатываемую зону двух и более технологических воздействий. Например, введение в зону механической обработки дополнительной энергии источников лазерного, плазменного и/или ультразвукового излучения обеспечивает кратковременное снижение прочностных свойств материала в технологической зоне на период обработки, что позволяет существенно увеличить производительность и повысить стойкость инструмента.

Таким образом, эффективность комбинированных технологий с использованием эффекта технологической наследственности при переходах от одной базовой технологии к другой обусловлена синергетическими эффектами от наложения технологических воздействий, а также снижением потерь времени за счет исключения и сокращения количества промежуточных и вспомогательных операций.



В комбинированных технологиях действие следующей технологической операции начинается до того, как установлено стационарное состояние после предыдущего технологического воздействия.

Несмотря на очевидные преимущества комбинированной технологии механической обработки с применением ультразвуковых колебаний, лазера, плазмы и других видов дополнительной энергии, несмотря на многочисленные факты ее эффективного применения в промышленности при обработке металлических и керамических материалов, следует отметить, что на сегодня возможности такой технологии используются далеко не полностью. Одной из причин такого положения является недостаточная изученность процесса, и как следствие, отсутствие четких рекомендаций для производства по определению оптимальных условий комбинированной обработки для различных конкретных производственных ситуаций, а также отсутствие простого и надежного высокопроизводительного оборудования для реализации комбинированной обработки.

В современном арсенале гибридных технологий сегодня насчитывается уже сотни методов и их разновидностей. Даже если рассматривать только механическую обработку материалов резанием, число известных к настоящему времени методов, технологий составляет более ста, и количество их продолжает возрастать. В качестве дополнительных концентрированных потоков энергии используются все новые физико-химические поля и их сочетания, все новые физические, химические и др. эффекты и явления.

В работе [23] предлагается классифицировать методы обработки по следующим признакам:

- 1) вид и число физико-химических воздействий;
- 2) способ подвода энергии в технологическую зону;
- 3) последовательность и размещение воздействий;
- 4) соотношение и количественные характеристики (концентрация) воздействий.

Авторы [23] отмечают, что основные сочетания различных видов энергии и способов ее подвода реализованы на практике в виде многообразия технологических процессов, позволивших не только существенно повысить производительность и качество обработки, но и получить ряд ранее неизвестных технических эффектов.

Каждый из физико-химических методов обработки представляет собой единый комплекс взаимосвязанных физико-химических явлений и может быть идентифицирован как сложная целенаправленная система, обладающая внутренней целостностью и относительной автономностью. Наглядное представление об основных элементах технологических систем и связях между ними может быть получено с помощью структурных схем, позволяющих методически правильно подойти к изучению и оптимизации этих систем по заданному критерию. Так, на основе принципиальной структурной схемы (рисунок 1.4) могут строиться частные схемы, учитывающие специфические особенности различных технологических процессов или предполагающие углубленное изучение отдельных сторон одного и того же процесса. Эта схема устанавливает связь между исходными (первичными) параметрами, которые задаются технологом или конструктором, и выходными (вторичными) параметрами системы. При этом наряду с исходными параметрами, характерными для обычной механической обработки (станок, приспособление, инструмент и др.), в зависимости от вида энергетического воздействия схема содержит ряд дополнительных элементов, присущих данному виду обработки.

К выходным параметрам системы, характеризующим технико-экономическую эффективность физико-химических методов обработки и сборки, авторы относят производительность и экономичность, работоспособность инструмента, усилие сборки и качество соединения, а также совокупность свойств, обуславливающих пригодность изделия удовлетворять определенные потребности в соответствии с назначением (качество продукции). Такими свойствами, в данном случае – эксплуатационными характеристиками, являются статическая и усталостная прочность, мало-

цикловая усталость и др. Как видно из схемы на рисунке 1.2, эксплуатационные характеристики определяются функциональными параметрами качества поверхностного слоя и точности обработки, каждый из которых, в зависимости от конкретных условий эксплуатации изделия, может выступать как параметр оптимизации (целевая функция). Например, для деталей, работающих при знакопеременных нагрузках, основным параметром оптимизации системы являются остаточные напряжения, оказывающие решающее влияние на предел выносливости.

Эксплуатационные характеристики изделия непосредственно связаны с его надежностью и долговечностью и, в частности, с такими показателями, как вероятность безотказной работы, интенсивность отказов, наработка на отказ и др. Воздействие первичных параметров системы на входе на параметры ее функционирования - реакция на выходе и связь между ними осуществляется через совокупность элементов, определяющих основные закономерности различных процессов физико-химической обработки.

В свою очередь, каждый из указанных элементов, рассматриваемых в рамках системы физико-химической обработки как некоторая целостность, может быть представлен в виде многоуровневой иерархии подсистем, необходимых и достаточных для описания подсистем высшего уровня и системы в целом [23].

Т.Г. Насад [24 – 28] предлагает классифицировать методы обработки по следующим признакам:

- 1) вид энергии (механическая, электрическая, химическая, тепловая);
- 2) способ подвода энергии (в зону резания, к заготовке, на некотором расстоянии от зоны резания);
- 3) вид физико-механического воздействия (пластическая деформация, плавление, испарение, анодное растворение, эрозионное разрушение);
- 4) схема формообразования (кинематическая схема обработки).

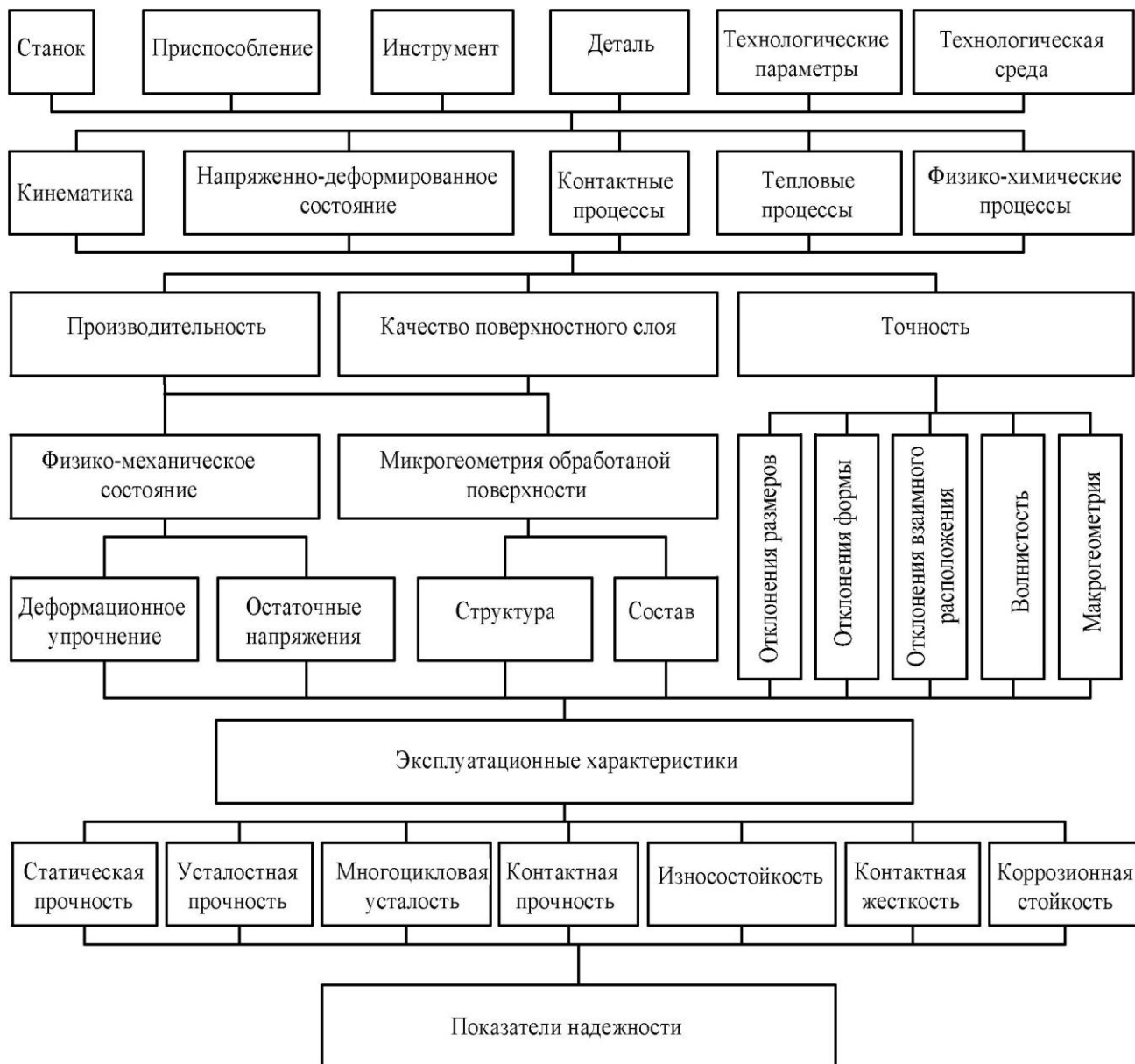


Рисунок 1.4 - Структурная схема физико-химической обработки [23]

Автор предлагает «Структурную схему системного подхода к процессу лезвийной обработки с предварительным подогревом» (рисунок 1.5), хотя и здесь рассматривается, как мы видим, не столько сам процесс, сколько система его исследования. В центре системы расположена подсистема «процессы высокоэффективной мехобработки с применением дополнительных потоков энергии в зоне резания», хотя ниже указаны подсистемы, относящиеся только к одному из видов энергии - тепловой энергии.

В работе [29] приводится классификация процессов и методов размерной обработки. Классификация позволяет любой из методов обработки описать десятизначным числом. Например, точение вала с дополнительным воздействием лазера на зону резания с охлаждением эмульсией под давлением можно обозначить числом: 0105208230 (0 – тепловая энергия, подводимая к объекту, 1 – механическая энергия, определяющая сьем материала, 0 – непрерывное распределение энергии во времени, 5 – точечно-поверхностный подвод энергии к объекту, 2 – главный физический процесс – пластическая деформация, 0 – характер формообразования – удаление припуска, 8 – вид среды – эмульсия, 2 – повышенное давление среды, 3 – вращательное давление заготовки, 0 – твердое состояние заготовки).

Оригинальный подход к классификации методов комбинированной обработки проявил М.Л. Хейфец [29 – 32]. Прежде всего, М.Л. Хейфец дает определение самого метода комбинированной обработки: «метод, в котором процесс преобразования, нанесения или удаления обрабатываемого материала происходит в результате протекания двух и более воздействий, осуществляемых по своему механизму» [29].

М.Л. Хейфец считает, что «обработку, представляющую собой доставку и преобразование вещества или энергии, целесообразно рассматривать со структурно-энергетических позиций в виде последовательности изменения состояний вещества и энергии. Поэтому он рассматривает энергию и вещество, в первую очередь, подводимые непосредственно к обрабатываемой детали, затем - энергию и вещество, воздействующие на деталь и определяющие вид физико-химического механизма обработки, и в завершение - энергию и вещество, формирующие структуры поверхности и свойства детали и характеризующие процесс обработки» [29].

«Физико-химические поверхностные явления, считает автор [30], определяют механизм воздействия на обрабатываемую деталь, а термомеханические процессы переноса вещества и энергии влияют на формирование поверхности и ее свойства. В процессе обработки возможны

неоднократные физические превращения энергии из одного вида в другой и химические реакции образования и распада веществ» [30].

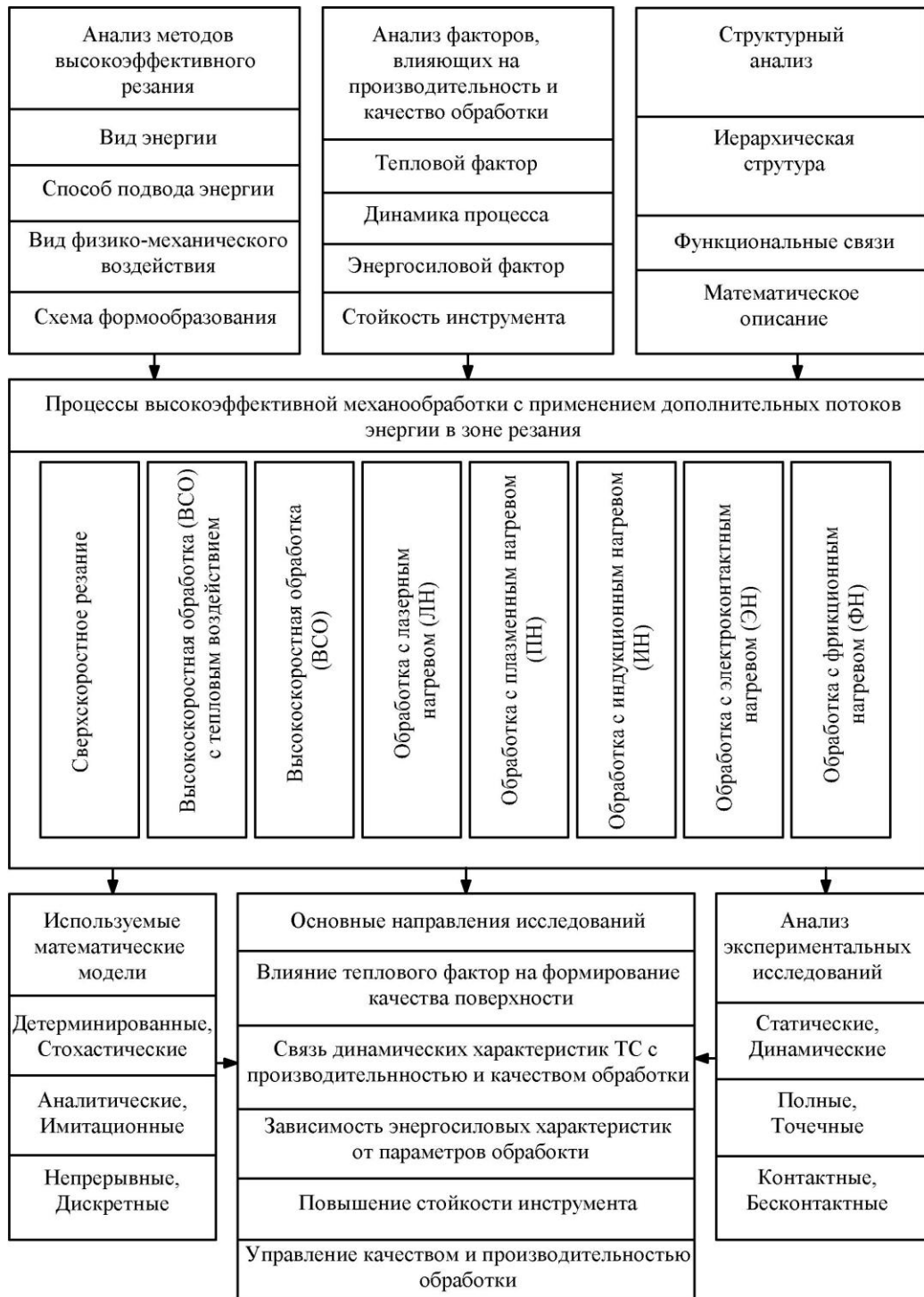


Рисунок 1.5 - Структурная схема системного подхода к процессу лезвийной обработки с предварительным подогревом [24]

Следовательно, для изучения процессов формирования поверхностного слоя при интенсивных воздействиях целесообразно исследовать в первую очередь термомеханические процессы и соответствующие им виды обработки, а затем переходить к физико-химическим процессам.

М.Л. Хейфец рассматривает «три группы методов, различающихся по виду обработки и рабочим воздействиям потоками вещества и энергии:

1) термомеханические (наплавка, резание, термообработка, деформирование и др.);

2) электрофизические (плазменные, электродуговые, электромагнитные, электрохимические и др.);

3) ионно-лучевые (лазерные, электронные и др.)» [29]

При разработке классификации методов комбинированной обработки автор исходит из того, что при создании методов комбинированной обработки традиционно выделяют три вида совмещения воздействий:

«1) Совмещение только в пространстве, но при воздействии с определенным сдвигом во времени. С ростом такого временного сдвига повышается совместимость воздействий, поскольку они становятся все более независимыми друг от друга. О совмещении воздействий свидетельствует только выполнение условия их реализации на специальном оборудовании, жестко связывающем процессы обработки» [29].

«2) Совмещение во времени, но при разнесении областей воздействий в пространстве. При достаточном удалении таких областей совмещение дает возможность объединить любые воздействия. О совмещении воздействий свидетельствует выполнение условия их реализации одновременно на одной детали» [29].

«3) Совмещение как в пространстве, так и во времени. Для обеспечения такого совмещения требуется тщательное изучение возможностей объединения воздействий при определенных режимах обработки» [29].

Из этих положений автора мы можем сделать вывод, что основной (мехобработка) и дополнительный (за счет ввода дополнительного потока

энергии) процессы могут проходить последовательно (первый случай) или параллельно (второй и третий случаи).

Данные [33 – 56 и др.] подтверждают сделанные выводы, а исследования точности формирования поверхностей свидетельствуют о целесообразности классификации процессов высокоинтенсивной комбинированной обработки по синергетическому принципу, в соответствии с начальными и граничными условиями рабочей зоны открытой технологической системы [57, 58].

Ю.М.Ермаков [59 – 61] выделяет следующие группы способов комбинированной обработки:

- 1) по виду воздействия;
- 2) по виду рабочей части инструмента;
- 3) по соотношению главных движений;
- 4) по форме и расположению режущих кромок инструмента;
- 5) по направлению движения подачи.

Приемлемой основой для классификации комбинированных методов обработки в свете задач, стоящих перед настоящей работой, нам представляется классификация, приведенная в [62]. Согласно данному подходу комбинированные методы обработки классифицируются по следующим основным признакам:

- 1) числу и наименованиям подводимых физико-химических воздействий;
- 2) способу подвода каждого воздействия в зону обработки;
- 3) характеру размещения физико-химических воздействий в пространстве и во времени;
- 4) количественным характеристикам совмещаемых воздействий (прежде всего энергии каждого из них) и соотношений их значений между собой.

Число и наименование подводимых физико-химических воздействий - первый признак - делит комбинированные методы обработки на классы. Первый класс - методы обработки, использующие один и тот же вид энергии, но два различных способа ее подвода (например, точение с наложением



низкочастотной вибрации для дробления стружки); второй класс - методы обработки, совмещающие два вида энергии, подводимой в зону обработки (например, резание с пропусканием электрического тока по цепи заготовка-инструмент или с предварительным индукционным нагревом срезаемого слоя); третий класс – методы обработки, совмещающие три различных вида энергии или два различных вида энергии и два способа ее подвода. Примером комбинированного метода обработки третьего класса может быть глубокое сверление отверстий в труднообрабатываемых материалах с наложением низкочастотной осевой вибрации и активных смазочно-охлаждающих технологических средств (СОТС).

«Способ подвода совмещаемых физико-химических воздействий - второй признак - делит комбинированные способы на методы с параллельным или последовательным подводом энергии. К первому методу относится, например, механическая обработка с пропусканием через зону резания электрического тока, ко второму - резание с предварительным подогревом слоя материала, снимаемого с заготовки с помощью индуктора токов высокой частоты, размещаемого на суппорте станка впереди резца. При последовательном подводе энергии эффективность совмещения одних и тех же видов энергии зависит также от порядка их следования. Например, в промышленности используются два комбинированных метода протягивания, в которых совмещены обычный процесс резания и пластическое деформирование материала. Первый метод выполняется протяжками, у которых режущие зубья располагаются впереди выглаживающих; так, например, применяется протяжка, режущая часть которой изготавливается из быстрорежущей стали, а последующее поверхностное пластическое деформирование осуществляется выглаживающими кольцами из твердых сплавов. Обработка деформирующе-режущими протяжками обеспечивает обратную схему последовательной комбинированной обработки; они работают по схеме опережающего пластического деформирования обрабатываемой поверхности. Одна секция такой протяжки имеет твердосплавный деформирующий элемент. За ней

следует и осуществляет процесс резания режущий элемент из быстрорежущей стали. Протяжка в целом имеет несколько таких секций и обеспечивает съём основного припуска. Окончательно поверхность отверстия в обеих рассмотренных конструкциях формируется дополнительными секциями переходных и калибрующих зубьев» [29].

Наименование комбинированного метода обработки определяется последовательностью действия физико-химических процессов; в соответствии с этим два рассмотренных выше комбинированных метода резания называются режуще-деформационная и деформационно-режущая механическая обработка.

Количественное соотношение совмещаемых процессов - третий признак – определяет степень взаимодействия различных видов физического и химического воздействия; они могут приводить только к количественному изменению процесса резания или вызывать его качественное изменение. По третьему признаку комбинированные методы разделяются на два типа.

1) Методы с преимущественным влиянием одного воздействия, например, механического; дополнительное воздействие, например, тепловое, снижая механические характеристики материала срезаемого слоя, повышает эффективность механического воздействия, качественно не изменяя обычного процесса механической обработки. Для комбинированных процессов этого типа различают базовые и дополнительные процессы; соответственно даются определения методу обработки; в качестве базового слова принимается доминирующий процесс;

2) Методы, у которых нельзя разделить физико-химические воздействия на основные и дополнительные (например, способ ультразвукового алмазно-электрического сверления); в этом случае процесс обработки может быть описан специфическими закономерностями, не совпадающими с составляющими их обычными процессами резания.

При комбинированных методах обработки, прежде всего второго типа, воздействие двух физических или химических процессов нельзя принимать как простую арифметическую сумму, так как иногда совмещение двух физических

воздействий может дать новые технические эффекты, обеспечивающие коренное повышение производительности обработки, стойкости инструмента и качества изготовления деталей. Для этого перечень совмещаемых процессов, их количественные характеристики, а также последовательность действия должны подбираться таким образом, чтобы они взаимно активизировали друг друга. Так, например, электроэрозионный процесс (помимо обычного воздействия) должен создавать зону предразрушения для последующего механического воздействия, и, напротив, механическое воздействие, вследствие обусловленной им вибрации и образования мелких частиц стружки, заполняющих рабочий зазор между электродами, повышает эффективность электроэрозионного разрушения.

Возьмём другой пример – обработка резанием с предварительным подогревом заготовки плазменной струёй (плазменно-механическая обработка - ПМО). Поверхностный слой заготовки разогревают плазменной струёй установленного на суппорте станка плазмотрона до потери материалом исходной прочности и в таком виде обрабатывают резцом. Это тоже комбинированная обработка. Но теперь задача первого перехода - временное изменение механических характеристик поверхностного слоя заготовки путём его подогрева. Форма и размеры заготовки не изменяются – это задача второго перехода. Без первого перехода второй был бы затруднён или вообще невозможен данным методом из-за высокой твёрдости и прочности обрабатываемого материала. Переставить переходы местами невозможно. Т.е. в данном случае суммарный эффект обработки нельзя представить как сумму двух переходов – нагрева и резания. Имеем типичный пример гибридной обработки. Таким образом, гибридная обработка является сложной технической системой, обладающей признаком целостности – «принципиальной несводимостью свойств системы к сумме свойств составляющих её элементов и невыводимость из последних свойств целого» [63]. Следовательно, и подходить к изучению физической сущности гибридных технологий следует с позиций системного подхода.

Системный подход диктует создание иерархической многопараметрической классификации объектов. На первом уровне такой классификации все технологии следует разделить на две большие группы – простые (монотехнологии) и сложные (комбинированные). На следующем уровне комбинированные технологии можно разделить на негибридные (у них пока нет названия) и гибридные. На третьем уровне можно классифицировать уже собственно гибридные технологии. Гибридные технологии можно классифицировать по числу источников энергии, их видам и способам подвода.

По числу источников энергии можно рассматривать гибридные технологии с двумя, тремя и т.д. источниками энергии (например, резание с подогревом; резание с подогревом и колебаниями и т.п.).

По видам источников энергии разделим их на основные и дополнительные. К основным источникам будем относить источники, определяющие вид обработки. Так, для гибридных технологий механической обработки к основным видам можно отнести резание, шлифование, поверхностное пластическое деформирование (ППД) и отделочную обработку. К дополнительным источникам энергии будем относить источники, не определяющие вид обработки, но способствующие обработке путём дополнительного воздействия на объект. Так, для гибридных технологий механической обработки на этом уровне можно различать такие физические поля, как механическое, акустическое, тепловое, химическое, электрическое, магнитное.

На следующем уровне можно классифицировать как основные виды обработки, так и дополнительные источники энергии. Так, к резанию можно отнести такие разновидности обработки как точение и растачивание; сверление, зенкерование и развёртывание; фрезерование и строгание; протягивание и прошивка; зубо - и резьбообработка. К механическому воздействию можно отнести деформации, удар, колебания.

Кроме того, дополнительные воздействия можно классифицировать по объекту воздействия. При гибридной механической обработке это может быть обрабатываемая заготовка, инструмент, зона обработки, технологическая среда.

Структурная схема классификации приведена на рисунке 1.6.

При классификации конкретных гибридных технологий можно воспользоваться таблицами 1.1 и 1.1.

С помощью схемы, рисунок 1.6, и таблиц 1.1 и 1.1 любому методу гибридной обработки можно присвоить соответствующий классификационный индекс, позволяющий раскрыть сущность метода.

Если рассматривать механическую обработку как систему [64, 65], можно выделить 5 подсистем (рисунок 1.7а): заготовка З, инструмент И, оборудование О, приспособление П и технологическая среда С. На рисунке 1.7а показаны также действующие в системе связи между подсистемами, без оценки их значимости.

Каждая из подсистем характеризуется совокупностью присущих ей характеристик.



Рисунок 1.7 - Схема классификации гибридных технологий

Таблица 1.1 - Классификация основной обработки

Инд екс	Наименование	Инде кс	Наименование
1	Резание	2	Шлифование
11	Точение, растачивание	21	Круглое (наружн., внутренн.)
12	Сверление, зенкер. развёрт.	22	Бесцентровое
13	Фрезерование, строгание	23	Плоское
14	Протягивание, прошивка	24	Ленточное

15	Зубо- и резбобработка	25	Зубо- и резбошлифование
16	Другое	26	Другое
3	ППД	4	Отделочная обработка
31	Обкатка, раскатка	41	Хонингование, суперфиниш.
32	Выглаживание	42	Полирование
32	Дробеударная обработка	43	Доводка, притирка
34	Другое	44	Другое

Таблица 1.2 - Классификация дополнительного воздействия

Инд екс	Наименование	Инде кс	Наименование
1	Механическое	42	Имплантация
11	Давление	43	Поверхн.-активное действие
12	Деформации	44	Другое
13	Удар	5	Электрическое
14	Колебания	51	Электроконтактное
15	Другое	52	Индукционное
2	Акустическое	53	Электростатическое
21	Ультразвук	54	Электронное
22	Другое	55	Комбинированное
3	Тепловое	56	Другое
31	Нагрев	6	Магнитное
32	Охлаждение	61	Постоянномагнитное
33	Комбинация нагрева и охл.	62	Электромагнитное
4	Химическое	63	Другое
41	Реакции	7	Другие воздействия

Основные характеристики заготовки: материал (класс, марка, состояние, механические и др. характеристики), вид (способ получения), состояние,

предварительная обработка, размеры и масса, точность (размеров, формы, расположения), шероховатость поверхностей, качество поверхностного слоя, технологические базы.

Основные характеристики инструмента: назначение, вид, разновидность, конструкция, материал режущей части, геометрия режущей части, число режущих элементов, состояние режущих кромок, размеры, стойкость, число переточек.

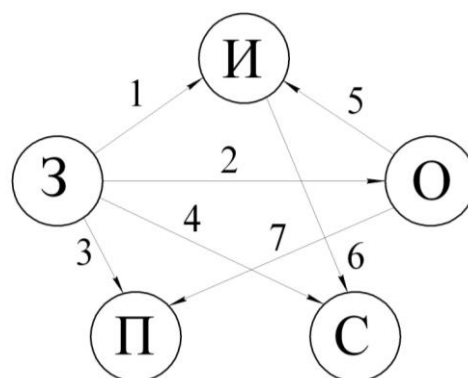
Основные характеристики оборудования: тип, модель, диапазон скоростей и подач, количество ступеней, уровень автоматизации, габариты и масса, стоимость.

Основные характеристики приспособления: тип, наименование, количество позиций, количество заготовок, особенности конструкции, опоры, зажимы, установочные элементы, вид привода, уровень автоматизации.

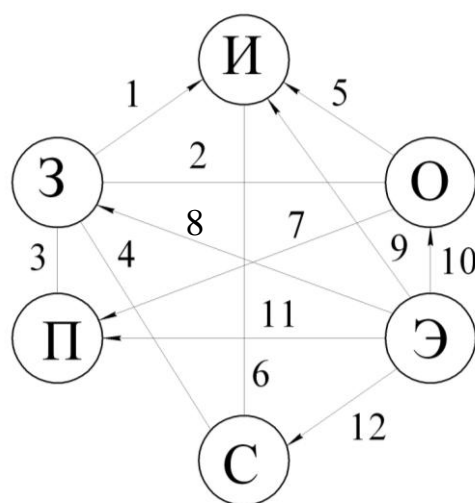
Основные характеристики технологической среды: агрегатное состояние, состав, способ подачи, производительность, давление, расход.

Указанные характеристики определяют основные связи в системе. Из рисунка 1.8а видно, что подсистема З связана со всеми другими подсистемами. Материал заготовки определяет выбор материала и геометрии режущей части инструмента (связь 1); размеры заготовки обуславливают типоразмер станка (2); конфигурация заготовки определяет выбор конструкции приспособления (3); материал заготовки обуславливает выбор технологической среды (4). Подсистема И связана с подсистемами З (об этом сказано выше), О и С. Вид и размеры инструмента зависят от типа оборудования (5); вид инструмента и его материал влияют на выбор технологической среды (6). Подсистема О связана с подсистемами З, И (примеры приведены выше) и П, поскольку конструкция приспособления непосредственно зависит и от конструкции станка (7). Подсистема С связана с подсистемами З и И (см. выше).





а)



б)

Рисунок 1.8 - Механическая обработка как система: а) – монотехнология, б) – гибридная технология; З – заготовка, И – инструмент, О – оборудование,

П – приспособление, С – технологическая среда, Э – дополнительный поток

концентрированной энергии

Гибридная технология обработки как система (рисунок 1.8б) содержит дополнительно подсистему ввода дополнительного источника концентрированной энергии Э. Несмотря на внешнюю схожесть систем, показанных на рисунках 1.5 а и 1.5б, содержание каждой из подсистем при введении в систему дополнительной подсистемы Э будет существенно различаться.

Подсистема Э в схеме гибридной мехобработки связана со всеми остальными подсистемами.

Подсистема Э связана с подсистемой З, так как концентрированный поток энергии может быть направлен от источника на заготовку в зоне обработки (8). Дополнительная энергия может быть направлена на то, чтобы изменить состояние поверхностного слоя заготовки, например, уменьшить его твёрдость и прочность и повысить обрабатываемость путём подогрева заготовки либо, наоборот, добиться охрупчивания материала в поверхностном слое путём его упрочнения (термообработкой или ППД), как, например, поступают при обработке вязких сплавов.

Подсистема Э связана и с подсистемой И, так как концентрированный поток энергии может быть направлен от источника на инструмент (9). Дополнительная энергия может быть направлена на то, чтобы изменить условия контакта инструмента с заготовкой и стружкой, уменьшить время контакта и адгезионную активность материалов инструмента и заготовки, снизить тепловую напряжённость в контакте и температуру рабочих поверхностей инструмента, что приведёт к повышению стойкости инструмента.

Связь 10 подсистемы Э с подсистемой О может выражаться в модернизации действующего или создании нового оборудования, способного реализовать ввод дополнительного потока энергии. Если техническая характеристика станка, осуществлявшего обработку по монотехнологии, не позволяет реализовать выполнение на нем операций по гибридной технологии, станок подвергают модернизации, от незначительной, как например совершенствование механизма подачи СОЖ для осуществления пульсирующей подачи или введение механизма осуществления осцилляции инструмента, до весьма существенной, как, например, применение комплекса устройств для подогрева заготовок при плазменно-механической обработке (плазмотрон, система подвода напряжения к обрабатываемой заготовке, система защиты от электрического тока, система охлаждения плазмотрона, система управления плазменной дугой, защита от излучения, вентиляционная система и т.д.).

Связь 11 подсистемы Э с подсистемой П может выражаться в изменении применяемой оснастки путем приспособления ее для ввода дополнительной энергии, либо в создании принципиально новой оснастки, обеспечивающей подвод дополнительного потока энергии в зону обработки. Новая или модернизированная оснастка предназначена для выполнения таких функций, как базирование и закрепление обрабатываемой заготовки (эту функцию приспособления выполняли и ранее), установка механизма подвода дополнительной энергии, установка основного (режущего или деформирующего) и вспомогательного инструмента и др.

Особого внимания заслуживает влияние дополнительного потока концентрированной энергии на безопасность работы по гибридным технологиям [66,67]. В процессе комбинированной обработки возникают две группы факторов, требующих специального внимания при проектировании и установке устройств для дополнительного ввода энергетического потока. К первой группе следует отнести такие факторы, как повышенная запыленность и загазованность воздуха на рабочем месте, повышенный уровень шума, повышенная температура, повышенный уровень вибраций и др. Ко второй группе можно отнести повышенные физические и нервно-психические нагрузки на оператора, поскольку теперь оператор отвечает не только за процесс обработки, но и за сопутствующие ему процессы, связанные с обеспечением параллельной работы устройств подвода дополнительной энергии, наблюдением за процессом обработки и процессом ввода дополнительной энергии в зону обработки, управлением процессом ввода дополнительной энергии и др. Все эти вопросы решаются как за счет совершенствования конструкции станка (О), так и за счет совершенствования технологической оснастки (П), а также путем разработки специальных дополнительных устройств.

Подсистема Э связана с подсистемой С, так как поток дополнительной энергии может быть направлен на технологическую среду (12). Так, наложение на смазывающе-охлаждающую жидкость ультразвуковых колебаний

способствует её лучшему проникновению в контакт между инструментом и заготовкой и более эффективному охлаждению зоны обработки.

Перечень гибридных методов механической обработки в укрупненном виде представлен в виде матрицы «основная обработка - дополнительная энергия» (таблица 1.3).

Укрупнённая матрица содержит 4 вида механической обработки (резание, шлифование, ППД, отделочная обработка) и 6 видов дополнительной энергии (механическая, акустическая, тепловая, химическая, электрическая, магнитная). На пересечении строк и столбцов матрицы образуются следующие виды гибридной обработки:

PM – обработка резанием с введением дополнительной механической энергии (например, точение с осцилляцией инструмента, по таблицам 1.2 и 1.3 индекс 11.14.2);

PA – резание с введением акустической энергии (точение с ультразвуком, 11.21.2);

PT – резание с введением тепловой энергии (точение с подогревом, 11.31.1);

Таблица 1.3 - Укрупнённая матрица гибридной механической обработки

Вид основной обработки	Виды дополнительной энергии					
	Механическая (М)	Акустическая (А)	Тепловая (Т)	Химическая (Х)	Электрическая (Э)	Магнитная (Ма)
Резание (Р)	МР	АР	ТР	ХР	ЭР	МаР
Шлифование (Ш)	МШ	АШ	ТШ	ХШ	ЭШ	МаШ
ППД (Д)	МД	АД		ХД	ЭД	
Отделочная (О)	О				О	О

	М			Х	Э	Ма
--	---	--	--	---	---	----

РХ – резание с введением химической энергии (сверление с введением поверхностно-активного вещества ПАВ, 12.43.3);

РЭ – резание с введением электрической энергии (фрезерование с электрическим током, 13.51.4);

РМа – резание с введением магнитной энергии (точение в магнитном поле, 11.62.4);

ШМ – обработка шлифованием с введением дополнительной механической энергии (шлифование с осцилляцией, 21.13.2);

ША – шлифование с введением акустической энергии (шлифование с ультразвуком, 21.21.3);

ШТ – шлифование с введением тепловой энергии (шлифование с охлаждением СОЖ – отрицательная энергия, 21.32.4);

ШЭ – шлифование с введением электрической энергии (шлифование с током, 21.51.4);

ШМа – шлифование с введением магнитной энергии (электромагнитное шлифование, 21.62.4);

ДМ – обработка ППД с введением дополнительной механической энергии (алмазное выглаживание с осцилляцией инструмента, 32.14.2);

ДА – ППД с введением акустической энергии (выглаживание с ультразвуком, 32.21.2);

ДХ – ППД с введением химической энергии (выглаживание с ПАВ в составе СОЖ, 32.43.3);

ДЭ – ППД с введением электрической энергии (обкатка роликом с током, 31.51.4);

ОМ – отделочная обработка с введением дополнительной механической энергии (суперфиниширование – хонингование с осцилляцией, 41.14.2);

ОХ – отделочная обработка с введением химической энергии (полирование с пастой, 42.41.1);

ОЭ – отделочная обработка с введением электрической энергии (электролитическое полирование, 42.55.3);

ОМа – отделочная обработка с введением магнитного поля (полирование в магнитном порошке, 42.62.2).

Часть клеток матрицы осталась незаполненной. Это не значит, что данная комбинация методов механической обработки и дополнительных физических полей невозможна. Просто на сегодня не разработано эффективных средств преобразования и доставки этих видов энергии в зону обработки.

Матрица включает только двойные комбинации, которых даже в укрупнённом представлении насчитывается 19 (без учёта незаполненных клеток таблицы 1.3). Число тройных сочетаний (с введением двух видов дополнительной энергии, например, электрохимическое полирование или точение с подогревом и осцилляцией) будет существенно больше. Если детализировать каждый метод обработки и каждый вид дополнительной энергии, число сочетаний становится просто огромным.

Таблица 1.3 даёт лишь общее представление о сочетаниях методов мехобработки с видами дополнительной энергии. Она может быть полезна только при общей оценке ситуации перед проектированием техпроцессов механической обработки.

На основе данной классификации можно предложить структурно-логическую схему комбинированной обработки (рисунок 1.9), которую целесообразно использовать как при исследовании заданных процессов гибридной технологии – шлифования, правки и ППД, так и при проектировании гибридных технологий в реальном производстве.

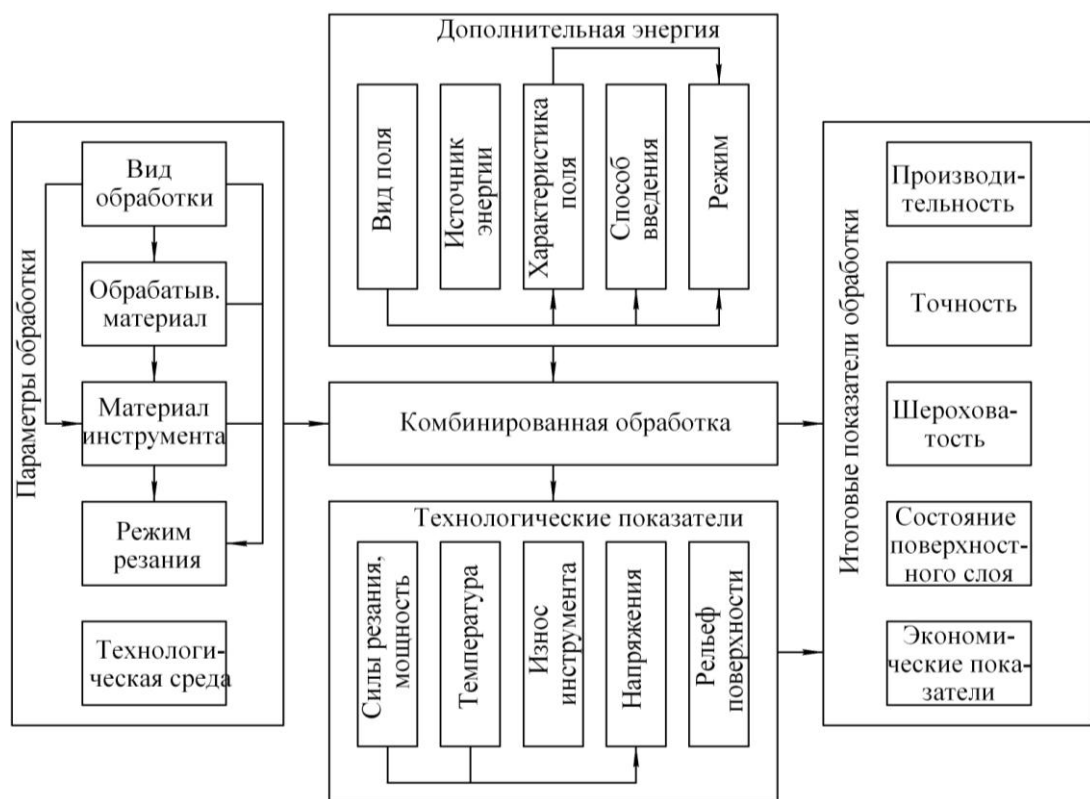


Рисунок 1.9 - Структурно-логическая схема комбинированной обработки

Анализ состояния использования гибридных технологий механической обработки показывает, что эти технологии обладают рядом преимуществ перед традиционными монотехнологиями. Основные из этих преимуществ можно свести к следующим.

1) Резкое повышение производительности обработки. Увеличение производительности при переходе от монотехнологии к комбинированной обработке может сократить от нескольких процентов до нескольких раз. Источниками повышения производительности при комбинированной механической обработке могут стать: снятие части припуска потоком дополнительной энергии, как правило (например, при плазменно-механической обработке); временное снижение физико-механических характеристик обрабатываемого материала (резание с подогревом, введение поверхностно-активных веществ); снижение сил и температуры резания (применение СОЖ, наложение колебаний); уменьшение количества операций (объединение

резания и поверхностного пластического деформирования); повышение производительности вспомогательных переходов (ультразвуковая правка шлифовальных кругов).

2) Повышение качества обработки с меньшими удельными затратами. Нередки случаи, когда добиться заданного качества только за счет совершенствования условий механической обработки бывает невозможно или экономически невыгодно даже при правильном применении данного типа механообработки. Источниками повышения качества обработки при переходе к гибридным технологиям механической обработки могут стать: введение чистовых и отделочных переходов в состав операций механообработки, например, обработка комбинированным режуще-деформирующим инструментом; уменьшение величины остаточных напряжений (в первую очередь, растягивающих) за счет снижения сил и температур (шлифование с применением ультразвуковых колебаний); уменьшение шероховатости обработанных поверхностей за счет обеспечения сливного стружкообразования (резание с подогревом, оптимальный подбор СОЖ); повышение точности обработки за счет снижения сил резания (резание с подогревом, применение поверхностно-активных веществ).

3) Возможность обработки труднообрабатываемых материалов, традиционная монотехнология обработки которых была бы весьма проблематичной. Гибридные технологии позволяют обрабатывать с достаточно высокой производительностью даже такие материалы, которые практически не поддаются механической обработке, а если поддаются, то производительность обработки настолько мала, что вынуждает отказаться от обработки и искать альтернативные решения. К таким материалам можно отнести металлокерамику, абразивные материалы (карбид кремния, электрокорунд, в том числе и легированный, карбид бора), композиционные материалы, специальные сплавы. Обработка изделий из этих материалов (деталей машин, инструментов и т.п.) резанием или пластическим деформированием весьма затруднена, а зачастую практически невозможна. Обработка этих материалов



стала экономически оправданной лишь с применением гибридных технологий. Механическая обработка труднообрабатываемых материалов с помощью гибридных технологий становится возможной или экономически оправданной за счет: изменения свойств обрабатываемого материала, таких как прочность, твердость, вязкость и т.п. под действием концентрированного потока энергии, что делает материал легкообрабатываемым, например, обработка с подогревом, применение поверхностно-активных веществ и др.; удаления части припуска концентрированным потоком дополнительной энергии, например, при плазменно-механической обработке, электроалмазном шлифовании.

Указанные преимущества – высокая производительность, высокое качество обработки и возможность обработки труднообрабатываемых материалов – позволяют утверждать, что за гибридными технологиями, в том числе и за гибридными технологиями механической обработки - будущее обрабатывающей промышленности.

При проектировании гибридных технологий механической обработки необходимо, прежде всего, установить лимитирующие факторы, ограничивающие повышение производительности обработки. К таким факторам следует отнести такие технологические показатели как силы резания (деформации), трение, температуру в зоне обработки, дробление стружки и стружкоотвод, стойкость инструмента, шероховатость поверхности, регулярность рельефа поверхности, остаточные напряжения в поверхностном слое детали. После этого необходимо определить виды дополнительного воздействия, которые могут повлиять на формирование этих показателей. Следует иметь в виду, что эти факторы влияют на указанные выше показатели как напрямую, так и опосредственно, через другие факторы. Например при плазменно-механической обработке производительность возрастает за счёт того, что плазменная струя сдувает часть припуска с заготовки, благодаря чему припуск на резание уменьшается. А кроме того нагрев заготовки снижает твердость и прочность её материала, что ведёт к снижению сил резания, а это тоже позволяет повысить производительность. Опосредственное же влияние

можно учесть с помощью схемы взаимосвязи показателей, рисунок 1.10. Так, из схемы видно, что, например, для улучшения стружкодробления и стружкоотвода достаточно учесть только те виды дополнительного воздействия, которые указаны в данной строке таблицы 1.3. А, например, для снижения температуры резания нужно использовать воздействия, влияющие как непосредственно на температуру, так и на силы резания и силы трения.

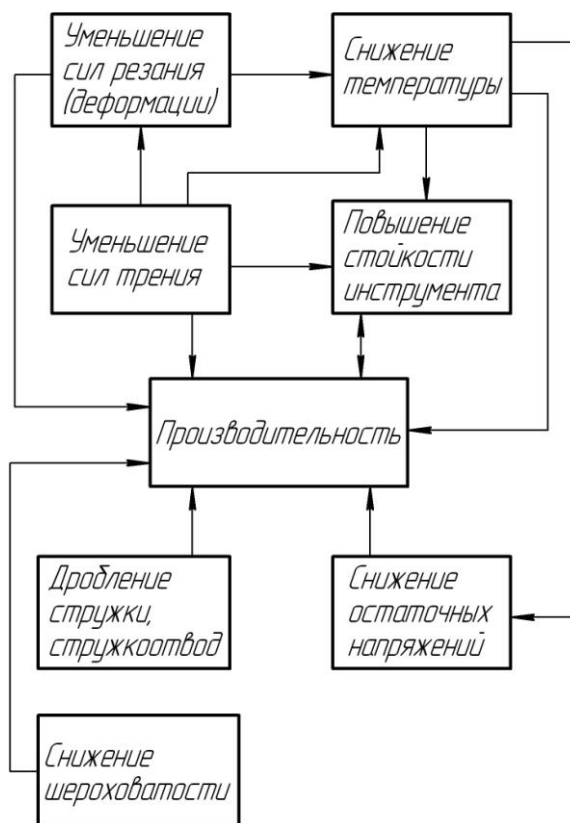


Рисунок 1.10 - Взаимосвязь технологических показателей

Структурно-логическая схема исследования процессов резания с нагревом и УЗК приведена на рисунке 1.11. На схеме прямоугольником обозначены подсистемы – результаты каждого из этапов исследований, а стрелками показаны связи между подсистемами – действия по получению результатов. Номера на стрелках указывают порядок действий. Содержание действий:

- 1 – осознание проблемы, выдвижение гипотезы;
- 2 – формулировка цели исследования;
- 3 – анализ состояния вопроса, формулировка задач исследования;

- 4 – разработка модели задачи и плана исследований;
- 5 – разработка математической модели, выбор технических ограничений;
- 6 – экспериментальные исследования, обработка результатов;
- 7 – построение математической модели;
- 8 – решение математической модели, оценка решения;
- 9 – сравнительный анализ решений, выбор оптимального решения;
- 10 – проверка гипотезы, оценка эффективности проекта;
- 11 – опытно-промышленная проверка, выработка практических рекомендаций.

Как уже было сказано выше, в машиностроении всё в более широких масштабах применяются труднообрабатываемые материалы – жаропрочные сплавы, наплавки, покрытия и т.п., обработка которых резанием вызывает трудноразрешимую проблему: из-за больших сил резания возникает опасность выхода станка из строя, поломки режущего инструмента, выкрашивания режущей кромки инструмента.

Мы выявили возникающее в данной ситуации физическое противоречие: материал детали должен быть прочным и непрочным. С помощью приема «Оптимизация», метода разделения противоречия во времени, мы установили, что материал детали должен иметь высокую прочность, обеспечивающую требуемую работоспособность детали, и должен иметь низкую прочность для обеспечения высокой обрабатываемости.

Из перечня физических эффектов, с помощью которых можно разрешить указанное ФП, выбраны предварительный разогрев материала и введение ультразвуковых колебаний.

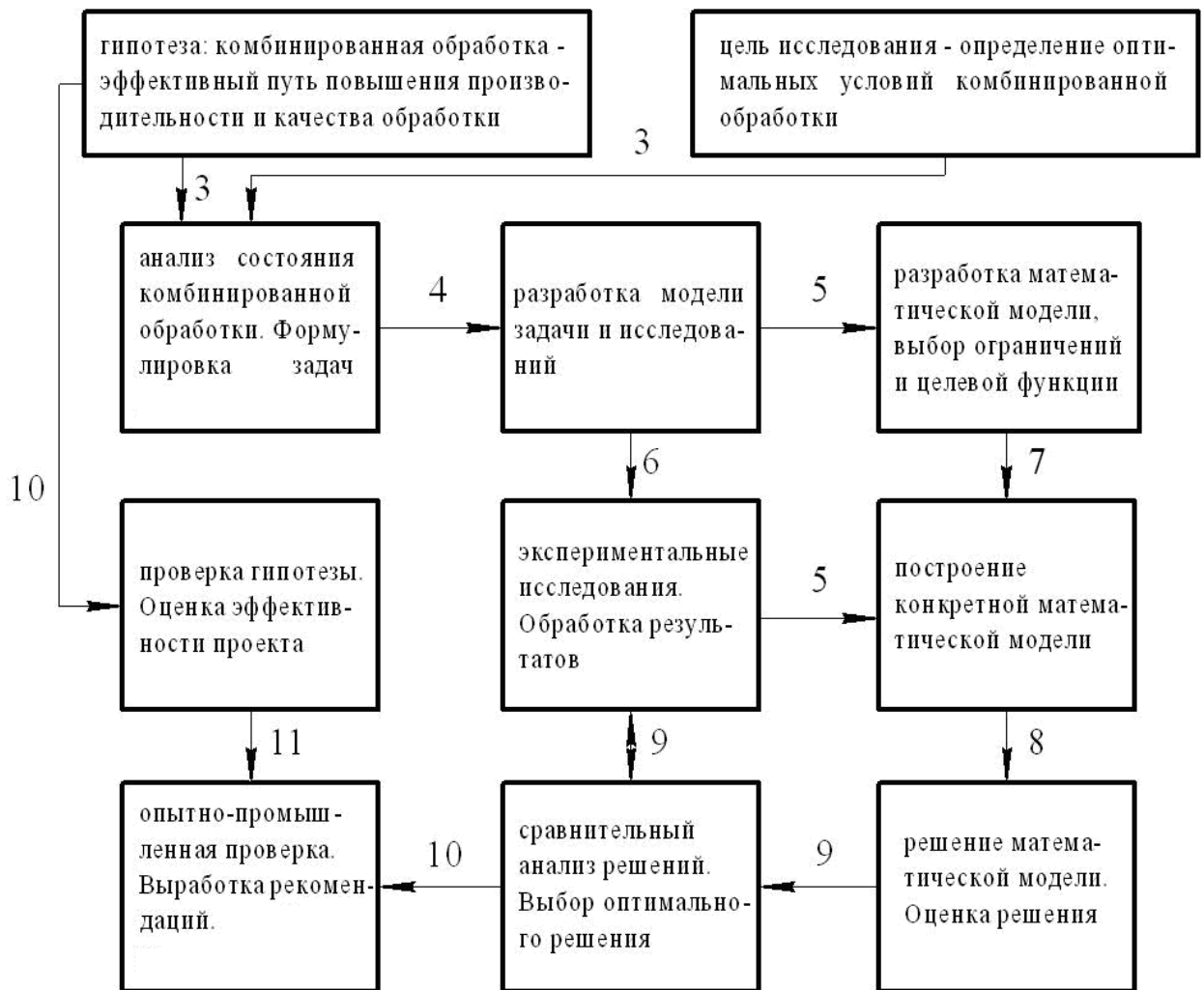


Рисунок 1.11 - Структурно-логическая схема исследования гибридной обработки

Основной проблемой, стоящей перед технологиями вибрационной обработки, является необходимость их введения в современные автоматизированные технологические процессы. Это обусловлено относительной сложностью их интеграции с автоматизированным циклом технологического процесса и отсутствием специального автоматизированного оборудования.

К сожалению, как показывает анализ работ [2, 5] и др., в литературе практически отсутствуют сведения о создании отечественного оборудования, обладающего возможностью реализовать такие наукоемкие технологии в производстве.

В то же время по данным зарубежных источников [6, 7] известно, что ведущие фирмы-производители станков активно развивают работы по созданию станков, способных работать в условиях автоматизированного цикла обработки с использованием дополнительной энергии ультразвука, лазера, плазмы и др.

Примеров такой работы может служить деятельность концерна *Gildemeister* (Германия), ставшего в настоящее время крупнейшей станкостроительной фирмой Европы и одной из крупнейших в мире, а также продукция японской фирмы *Yamazaki Mazak* (Япония) [8].

Выпускаемая концерном *Gildemeister* номенклатура станков включает серию гибридных многоцелевых станков, реализующих принцип гибридных и комбинированных технологий, а также лазерные и ультразвуковые станки. Большая часть многоцелевых станков имеет агрегатно-модульную конструкцию и значительное количество взаимозаменяемых узлов. Данный пример наиболее показателен для текущей ситуации с развитием отечественного производства, что делает задачу разработки и изготовления методов и средств реализации гибридных технологий в современном производстве своевременной и актуальной.

Наглядным примером внедрения гибридных технологий концерном *Gildemeister* можно отнести, например, следующие станки: многоцелевой мод. *DMC60S* для обработки вращающихся с частотой до 12 000 мин<sup>-1</sup> прутковых заготовок с шести сторон диаметром до 103 мм и длиной до 1100 мм; лазерный мод. *DML 60 HSC*, на котором высокоскоростную черновую обработку выполняют фрезерной головкой с частотой вращения 12 000 мин<sup>-1</sup> (42000 мин<sup>-1</sup> по заказу), а затем чистовую - лазером типа *NdYAG* немецкой фирмы *Rofin Sinar* мощностью 100 Вт с диаметром луча 0,1 мм, что в совокупности позволяет обеспечить испарение материала на глубину 1 - 5 мкм и во многих случаях исключить дорогостоящую электроэрозионную обработку.

Серия ультразвуковых станков *DMS/ULTRASONIC* впервые позволяет выполнять ультразвуковое шлифование *DMS35*, сверление, фрезерование

DMS50 керамики, стекла, графита, кремния и т.д. с алмазным шлифовальным инструментом, который устанавливается на шпиндель, который дополнительно вибрирует с частотой 20 кГц.

В пользу сложившейся за рубежом тенденции интенсификации производственных процессов путем внедрения комбинированных технологий можно отнести автоматизированные станочные комплексы с ЧПУ, которые представляют предприятия BLUM и SCHTUDER (Германия), обеспечивающие возможность повышения производительности процессов высокоскоростного шлифования. В этом случае обеспечивается высокоскоростной съем материала заготовки за счет маятникового шлифования при комбинированной обработке с применением лезвийной обработки. Показана эффективность комбинированной обработки на станке S242 предприятия BLUM и SCHTUDER обеспечивает замену процесса шлифования на круглошлифовальном станке, оснащенном тремя шлифовальными кругами за две установки детали. В современном варианте обработка детали на станке S242 осуществляется одним шлифовальным кругом и тремя резцами для твердого точения и выполняется за одну установку детали. Это позволяет существенно повысить производительность и качество обработки изделия [98].

Основными достоинствами оборудования, реализующего комбинированную обработку, является возможность повышения производительности (до 5 раз и более) в сравнении с традиционными станками, работающими методами традиционных технологий.

Наличие комплекса автоматизированного контроля над протеканием процесса обработки и циклов автоматической коррекции режущего инструмента в процессе обработки, автоматическое регулирование величины рабочей подачи в процессе обработки осуществляется на основе специально разработанных алгоритмов управления АСР (Adaptive Control- адаптивный контроль) и АСР (Acoustic Control- акустический контроль) позволяет обеспечить шероховатость обработанной поверхности  $Ra < 0,2$  мкм.



Рисунок 1.12 - Общий вид ультразвукового станка серии  
ULTRASONIC DMS35

На автоматизированном комплексе ULTRASONIC DMS35 (рисунок 1.12) впервые реализована совместная технология обработки с ЧПУ и ультразвуковая обработка высокотехнологичных материалов. Интенсификации процессов комбинированной обработки способствует высокая эффективность 3-осевой обработки с помощью интегрированной ЧПУ Siemens 840 D powerline с постоянным контролем процесса ADC (Adaptive Control- адаптивный контроль) и ACC (Acoustic Control- акустический контроль) ультразвуковой обработки с автоматическим регулированием подачи и числа оборотов шпинделя.

На ультразвуковом комплексе серии ULTRASONIC DMS50 (рисунок 1.13) реализована комбинированная технология 3D-фрезерования закаленных деталей из современных материалов.

Применение специальных циклов позиционирования при управлении работой линейных приводов позволяет достичь точности позиционирования

заготовки в рабочей зоне  $\pm 2,5$  мкм, а предельное ускорение линейных перемещений по осям X, Y, Z более 1,4 g. Это позволяет достичь наряду с преимуществами ультразвуковой обработки точности обрабатываемых поверхностей в пределах  $\pm 1$  мкм, поддерживая при этом высокую динамику и производительность процессов комбинированной обработки.



Рисунок 1.13 - Общий вид ультразвукового станка серии  
ULTRASONIC DMS50

Ультразвуковой комплекс серии ULTRASONIC DMS55 (рисунок 1.14) реализует комбинированные технологии производительной обработки высокотехнологичных материалов с помощью ультразвука. Применение комплекса направлено на интенсификацию процессов обработки путем совмещения в одной рабочей зоне процессов ультразвукового шлифования, сверления и фрезерования, что позволяет достичь в сочетании с высокой производительностью высоких показателей точности, так как исключает вспомогательные переходы на переустановку детали. Также для автоматизации процессов загрузки и смены деталей предусматривается применение автоматического сменщика паллет. Дальнейшее развитие процессов комбинированной обработки обеспечивается компонованием станка приводным поворотным столом с гидравлическим механизмом крепления



заготовки, автоматическим делением движения поворота стола, что позволяет выполнять циклы ультразвуковой обработки по размерному контуру заготовки.



Рисунок 1.14 - Общий вид ультразвукового станка серии  
ULTRASONIC DMS55



Рисунок 1.15 - Общий вид ультразвукового станка серии  
ULTRASONIC DMS60

Ультразвуковой комплекс серии ULTRASONIC DMS60 (рисунок 1.15) позволяет в сочетании с 5-осевой ультразвуковой обработкой ЧПУ выполнять процессы 3D-фрезерования в рабочей зоне станка. Данное решение наряду с преимуществами ультразвуковой обработки обеспечивает высокую гибкость при контурной 5-осевой обработке с перемещением до 1000 мм по осям OX/OY/OZ.

Для повышения эффективности ультразвуковой многосторонней обработки, одновременно по нескольким координатным осями станок укомплектован круглым поворотным столом с программным управлением при позиционировании. Это обеспечивает высокий уровень интеграции ультразвуковой обработки и традиционных методов обработки на станке с ЧПУ.

Применение современных систем управления серии Siemens 840D powerline позволяет выполнять обработку ультразвуком по замкнутому циклу благодаря гибкости программирования циклов Ultrasonic-сверления, фрезерования и шлифования на одном станке.

Процесс вибрационного точения, фрезерования или шлифования приводит к сравнительно меньшим термическим напряжениям в сравнении с традиционными методами обработки и повышает стойкость инструмента. Благодаря этому достигается существенное повышение качества обработанных поверхностей.

Сочетание таких функций модульной системы управления Siemens 840D powerline, как автоматический контроль изменения ускорения и предварительный выбор параметров скорости ускорения, функция Look-a-Head и функция ориентации инструмента, позволяет более гибко приспособлять ультразвуковые процессы обработки к переменным режимам обработки - скорости, точности и качеству поверхности и повысить производительность методов ультразвуковой обработки.

Все большее применение находят металлорежущие станки, оснащенные волоконным лазером, позволяющие интегрировать целый ряд процессов

лазерной обработки в самые разнообразные технологические линии. Так, волоконные лазеры НИИ Fraunhofer IWS Dresden производят инфракрасный свет с длиной волны порядка 0,001 мм, который оптимально поглощается такими металлами, как сталь и алюминий. Волоконный лазер может резать и сваривать детали вдвое быстрее чем CO<sub>2</sub>-лазеры такой же мощности с длиной волны 0.010 мм.

Таблица 1.4 - Характеристика рабочих процессов ультразвуковой обработки станков фирмы Gildemeister

Наименование параметра	Значение
Рабочая область X / Y / Z, мм	750 / 600 / 520
Диапазон частоты вращения шпинделя ULTRASONIC, мин <sup>-1</sup>	до 6 000
Мощность привода, кВт	35
Мощность ультразвукового генератора, кВт	300
Ультразвуковой диапазон частот, кГц	17,5 – 30
Диапазон подач, мм/мин	0-20 000

Станки, оборудование, устройства для лазерной резки материалов – новое, перспективное направление в станкостроении, позволяющее достичь высоких показателей как по производительности процесса (более чем в 5 раз), так и по качеству резки. Станки, оборудование, устройства для плазменной резки – другой экономически эффективный путь, который благодаря чрезвычайно концентрированному приложению энергии обеспечивает высокие скорости резки мягких и низкоуглеродистых сталей. По сравнению с ацетилено-кислородной резкой потребление энергии значительно меньше, поэтому обработанные детали являются достаточно точными.

Предприятием Trumpf (Германия) предлагается серия станочных

комплексов TruMatic - 6000 агрегатно-модульной компоновки для комбинированной обработки с ЧПУ. Комплекс совмещает методы механической вырубki и лазерной технологии обработки металлов, с помощью станочных комплексов комбинированной обработки с ЧПУ (рисунок 1.16). Аналогичная технология разработана японской фирмой AMADA [10].

Комплекс TruMatic - 6000 комбинированной технологии вырубki и лазерной резки, позволяет выполнять работы с высокой производительностью. Стандартные контуры, такие как круглые или прямоугольные отверстия, а также накатка резьбы и формообразование обрабатываются за один удар вырубной частью станка. Различные внутренние и внешние контуры обрабатываются лазером для получения гладкой кромки без заусенцев.

Лазер устанавливается на станине. Лазер, установленный на станине комплекса TruMatic – 6000 обеспечивают высокую плотность и качество лазерного луча, обладают большой надежностью при интенсификации производственных процессов. Режимы и параметры лазерной резки хранятся в памяти системы управления, следовательно, оператору не приходится подбирать режимы "в ручном режиме". Для установки на комплекс предусмотрено три варианта лазера различной мощности.

Расширены и возможности автоматизации благодаря модульной компоновке, при этом функциональные возможности TruMatic - 6000 могут быть расширены до полностью автоматического участка, где каждое изделие будет извлекаться и сортироваться автоматически (см. таблицу 1.2). Комбинированные комплексы Trumpf (также как и координатно-револьверные) можно превратить в гибкие производственные участки, дополняя их автоматизированными модулями. Модульные компоненты позволяют автоматизировать производство до необходимой степени синхронизации производственного цикла [10].

Турецкая фирма Ergmaksan предлагает плазменно-пробивной комплекс CPP-30 (рисунок 1.17). Технология представляет собой совмещение высокоточной плазменной резки и гидравлического пресса на жесткой основе.

Эта технология позволяет значительно расширить ассортимент выпускаемой продукции, уменьшить время изготовления и при этом снизить затраты на выпуск изделий.

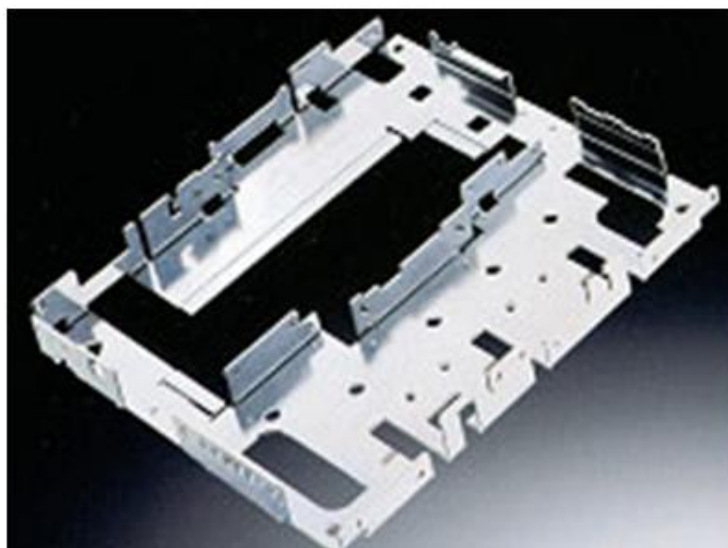


Рисунок 1.16 - Архитектура модульной компоновки комплекса TruMatic - 6000 и готовое изделие

Обрабатываемое на станке полотно может вращаться на поворотном столе по осям X и Y, удерживаемое гидравлическими зажимами. Полотно режется исключительно точно по заданному контуру с использованием

моторизированной сервоавтоматики. Особая компоновка комплекса позволяет контролировать процесс производства при помощи интегрированной оптической системы с трех сторон [11].

Таблица 1.5 - Параметры комплексов комбинированной обработки серии TruMatic - 6000

Наименование параметра	Значение
Мощность лазера, Вт	4000
Усилие вырубки, кН	300
Пределы подачи (OX) x (OY), мм	2500 x 1270
Число инструментальных позиций	45

Стандартная комплектация включает Hi-Focus плазменный генератор с автоматической системой управления высоты с сервоприводом фирмы Kjellberg, систему ЧПУ, CAD/CAM программное обеспечение Lantek Expert Punch и др.

К сожалению, отечественная станкоинструментальная промышленность еще не восстановила утраченные в 90-х годах XX века позиции, как на международном, так и отечественном рынках. Существенно уменьшился выпуск и номенклатура станков. Значительная часть комплектующих – производства зарубежных фирм.

В отличие от зарубежных производителей отечественная промышленность пока ограничивается производством универсального и специализированного оборудования для ультразвуковой обработки. Из литературы неизвестны образцы станков, реализующих принцип комбинированной и гибридной технологии [101, 102 и др.].

Очевидно, что по сравнению с зарубежными аналогами оборудования для ультразвуковой обработки отечественное оборудование значительно уступает

этим аналогам. Это является препятствием на пути интеграции оборудования для реализации гибридной технологии, в том числе ультразвуковой обработки в современные производственные процессы.



Рисунок 1.17 - Вид на рабочую зону плазменно-пробивного комплекса СРР-30

На основе литературного обзора среди предложенных путей модернизации токарных станков следует выделить следующее:

1) Использование инструментальных блоков, значительно расширяет возможности станка, так как появляется возможность обработки детали такими инструментами, как метчик, сверло или фреза, причём обработку производить не только вдоль оси детали, но и параллельно оси, что позволит выполнять шпоночные отверстия изображённые на рисунке 1.2. и отверстия с внутренней резьбой, как на рисунке 1.1.

2) Рассмотренную конструкцию сверлильной оправки можно использовать в разработке соединения привода и инструментального блока, которое позволит без задержек во времени осуществлять переключение.

## Глава 2 Расчет и проектирование привода инструментального модуля

### 2.1. Исходные данные для проектирования

#### 2.1.1 Расчёт режимов резания

Для разработки привода инструментального блока, необходимо рассчитать режимы резания, для операции фрезерования шпоночного паза, так как данная операция является наиболее нагруженной. На рисунке 2.1. показан паз, который нужно профрезеровать.

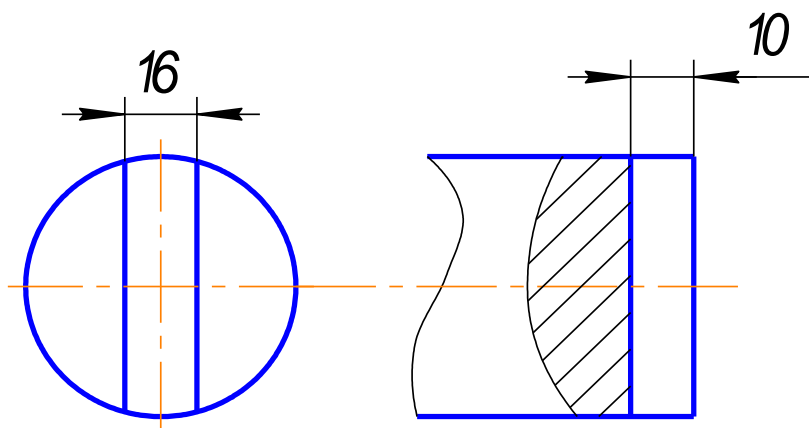


Рисунок 2.1 - Шпоночный паз

Для фрезерования данного паза выбираем инструмент шпоночная фреза по ГОСТ 9140-78.

$D=16$  мм – диаметр фрезы;

$l=19$  мм – длина рабочей части фрезы;

$L=79$  мм – общая длина фрезы;

$t=10$  мм – глубина фрезерования;

$B=16$  мм – ширина фрезерования.



По таблице 34 в [8] для обработки паза на валу из материала Сталь 45 выбираем подачу

$$S = 0,25 \text{ мм/об.}$$

1) Скорость резания  $U$  рассчитывается по формуле:

$$U = \frac{C_v D^q}{T^m \cdot t^x S_z^y \cdot B^u \cdot Z^p} \cdot K_v \text{ м/мин}; \quad (2.1)$$

где:  $C_v, x, m, y, u, p$ : – коэффициент и показатели степени для конкретных условий обработки а именно: обрабатываемый материал имеет свойства  $\sigma_B = 600$ . По рекомендациям в [8] выбираем следующие коэффициенты:  $C_v = 12, q = 0,3, m = 0,26, y = 0,25, x = 0,3, u = 0, p = 0$ ;

$T$  – период стойкости инструмента, в данном случае 60 минут.

Поправочный коэффициент  $K_v$  – представляет собой произведение ряда коэффициентов учитывающих фактическое усилие резания, и рассчитывается по формуле:

$$K_v = K_{mv} \cdot K_{nv} \cdot K_{uv}; \quad (2.2)$$

где:  $K_{nv} = 1$ ; – коэффициент, учитывающий состояние поверхности.

$K_{uv} = 1$ ; – коэффициент, учитывающий материал инструмента.

$K_{mv} = 1,1$ ; – коэффициент, учитывающий влияние материала заготовки.

$$K_v = 1 \cdot 1 \cdot 1,1 = 1,1;$$

Найдем величину скорости резания  $U$ :

$$U = \frac{12 \cdot 16^{0,3}}{60^{0,26} \cdot 10^{0,3} \cdot 0,25^{0,25} \cdot 16^0 \cdot 2^0} \cdot 1,1 = 7,4 \text{ м/мин}$$

2) Частоту вращения  $n$  рассчитаем по формуле:

$$n = \frac{1000 \cdot v}{\pi \cdot D} \text{ об/мин}; \quad (2.3)$$

где:  $D$  – диаметр фрезы, мм;

$v$  – скорость резания, м/мин.

$$n = \frac{1000 \cdot 7,4}{3,14 \cdot 16} = 147,2 \text{ об/мин};$$

Выбираем число оборотов для спроектированного механизма:

$n = 260$  об/мин

5) После чего уточняем скорость резания по формуле:

$$v = \frac{n \cdot \pi \cdot D}{1000} \text{ м/мин}; \quad (2.4)$$

где:  $D$  – диаметр фрезы, мм;

$n$  – число оборотов, об/мин.

Подставляя значения в формулу находим что, скорость  $v$  равна:

$$v = \frac{260 \cdot 3,14 \cdot 16}{1000} = 13 \text{ м/мин};$$

Принимаем скорость резания  $v$  равную 13 м/мин.

4) Рассчитаем окружную силу  $P_z$  по формуле:

$$P_z = \frac{10 \cdot C_p \cdot t^x \cdot s_z^y \cdot B^n \cdot z}{D^q \cdot n^w} K_{MP}; \quad (2.5)$$

где:  $C_p, q, y, x, w, K_{MP}$  коэффициент и показатели степени для конкретных условий обработки а именно: обрабатываемый материал Сталь 45  $\sigma_B = 600$  , материал режущей части инструмента Р6М5. По рекомендациям в [1] выбираем следующие коэффициенты:

$$C_p = 68,2; x = 0,86; q = 0,86; y = 0,72; w = 0, K_{MP} = 0,94;$$

$$P_z = \frac{10 \cdot 68,2 \cdot 2^{0,86} \cdot 0,25^{0,72} \cdot 16^1 \cdot 2}{16^{0,86} \cdot 260^0} \cdot 0,94 = 1264,5H;$$

Из соотношений сил резания по рекомендациям в [8] найдём  $P_x, P_y, P_H$  и  $P_v$ .

$$P_x = P_z \cdot 0,5 = 1264,5 \cdot 0,5 = 632,25H;$$

$$P_v = P_z \cdot 0,9 = 1264,5 \cdot 0,9 = 1138,05H;$$

$$P_H = P_z \cdot 0,3 = 1264,5 \cdot 0,3 = 379,35H;$$

$$P_y = P_z \cdot 0,5 = 1264,5 \cdot 0,5 = 632,25H;$$

б) Угловая скорость рассчитывается по формуле:

$$\omega = \frac{\pi \cdot n}{30} = \frac{3,14 \cdot 260}{30} = 27,2 \frac{M}{мин}; \quad (2.6)$$

7) Крутящий момент найдём по формуле:

$$M_{кр} = \frac{P_z \cdot D}{2 \cdot 100} H \cdot м; \quad (2.7)$$

$$M_{кр} = \frac{1264,5 \cdot 16}{2 \cdot 100} = 101,16H \cdot м;$$

8) Мощность резания найдём по формуле:

$$N_e = \frac{P_z \cdot V}{1020 \cdot 60} \text{ кВт}; \quad (2.8)$$

$$N_e = \frac{261,4 \cdot 13}{1020 \cdot 60} = 0,27 \text{ кВт};$$

Учитывая запас, мощность двигателя принимаем равную 1,5 кВт.

### 2.2.1 Расчёт параметров электродвигателя.

Исходные данные:

- номинальная мощность  $P_{\text{ном}} = 1,5$  кВт;
- номинальное напряжение сети  $U_{\text{ном}} = 220$  В;
- номинальная частота вращения  $n_{\text{ном}} = 260$  об/мин;
- максимальная частота вращения  $n_{\text{мах}} = 600$  об/мин;

#### 1. Главные размеры двигателя

##### 1.1. Предварительное значение КПД при номинальной нагрузке

$$\eta_{\text{ном}} = 0,755$$

##### 1.2. Расчетная мощность двигателя

$$P_i = P_{\text{ном}} \cdot \eta_{\text{ном}} = 1,5 \cdot 0,755 = 1,13 \text{ кВт} \quad (2.9)$$

##### 1.3. Наружный диаметр якоря и число главных полюсов выбираем равные

$$D_2 = 46 \text{ мм}; 2p = 4.$$

##### 1.4. Предварительное значение коэффициента полюсного перекрытия при

$$2p = 4 \text{ и } D_2 = 46 \text{ мм}, p_i = 0,65.$$

1.5. Предварительное значение максимальной магнитной индукции в воздушном зазоре

$$B = 0,58 \text{ Тл.}$$

##### 1.6. Предварительное значение линейной нагрузки

$$A_2 = 210 \cdot 10^2 \text{ A/м.} \quad (2.10)$$

### 1.7. Расчетная длина сердечника якоря

$$\ell_i = \frac{6,1 \cdot 10^{12} \cdot P_i}{k_B \cdot k_{OB} \cdot \alpha_i \cdot n_{НОМ} \cdot D_2^2 \cdot B_B \cdot A_2} \quad (2.11)$$

$$\ell_i = \frac{6,1 \cdot 10^{12} \cdot 1,13}{1 \cdot 1 \cdot 0,65 \cdot 260 \cdot 46^2 \cdot 0,58 \cdot 210 \cdot 10^2} = 63 \text{ мм}$$

### 1.8. Коэффициент длины сердечника якоря

$$\lambda = \frac{l_i}{D_2} = \frac{63}{46} = 1,37 \quad (2.12)$$

### 1.9. Внутренний диаметр сердечника якоря

$$D_{2BH} = 0,43 \cdot D_2 = 0,87 \cdot 46 = 40 \text{ мм}$$

## 2. Дополнительные размеры

### 2.1. Конструктивная длина сердечника якоря

$$l_2 = l_i = 63 \text{ мм}$$

### 2.2. Воздушный зазор эксцентричный, принимаем 0,9 мм

Тогда

$$\delta_{\max} = \frac{0,9}{1,5} = 0,6 \text{ мм}; \quad (2.13)$$

$$\delta_{\min} = 0,9 \cdot 2 = 1,8 \text{ мм}. \quad (2.14)$$

### 2.3. Длина сердечника главного полюса

$$l_m = l_2 = 63 \text{ мм.}$$

### 2.4. Предварительное значение высоты главного полюса

$$h_m = 20 \text{ мм.}$$

### 2.5. Полусное деление

$$\tau = \pi \cdot D_2 / 2\rho = \frac{3,14 \cdot 63}{4} = 50 \text{ мм} \quad (2.15)$$

### 2.6. Магнитная индукция в сердечнике главного полюса

$$B_m = 1,65 \text{ Тл.}$$

### 2.7. Ширина сердечника главного полюса

$$b_m = \frac{B_\delta \cdot \alpha_i \tau \cdot \sigma}{k_{C1} B_m} = \frac{0,58 \cdot 0,65 \cdot 50 \cdot 1,2}{0,98 \cdot 1,65} = 12 \text{ мм} \quad (2.16)$$

### 2.8. Ширина выступа полюсного наконечника главного полюса

$$b_{\text{мн}} = 0,10 * b_m = 0,10 * 12 = 1,2 \text{ мм.}$$

### 2.10. Высота полюсного наконечника в основании выступа

$$b_m = \frac{B_\delta}{1,67 B_m} (b_p - b_m) = \frac{0,58}{1,67 \cdot 1,65} (32,5 - 12) = 4,32 \text{ мм} \quad (2.17)$$

где длина полюсного наконечника

$$b_p = 0,65 * 50 = 32,5 \text{ мм.}$$

2.12. Сердечники главных и добавочных полюсов изготавливаем из электротехнической стали марки 3411 толщиной 1 мм ( $k_c = 0,98$ ).

2.13. Длина сердечника добавочного полюса

$$l_d = l_2 = 63 \text{ мм.}$$

2.14. Ширина сердечника добавочного полюса

$$b_d = 12 \text{ мм.}$$

Число добавочных полюсов

$$2p_d = 4.$$

2.15. Воздушный зазор между якорем и добавочным полюсом

$$o_d = 1 \text{ мм.}$$

2.16. Длина станины

$$l_{cl} = l_2 + k_l = 63 + 0,65 * 50 = 80 \text{ мм,} \quad (2.18)$$

где  $k_l = 0,65$ . Материал станины - сталь марки Сталь 45.

2.17. Толщина станины

$$b_m = \frac{B_\delta \cdot \alpha_i \tau \cdot \sigma \cdot l_2}{2l_{c1} B_{c1}} = \frac{0,58 \cdot 0,65 \cdot 50 \cdot 1,2 \cdot 63}{0,98 \cdot 1,65} = 14 \text{ мм} \quad (2.19)$$

где  $B_{c1} = 1,28$  Тл.

### 2.18. Внутренний диаметр станины

$$D_{1\text{вн}} = D_2 + 2\delta_{\text{мин}} + 2h_m + 2\delta = 63 + 2 \cdot 0,6 + 2 \cdot 40 + 2 \cdot 0,9 = 60 \text{ мм.} \quad (2.20)$$

### 2.19. Наружный диаметр станины

$$D_1 = D_{1\text{вн}} + 2h_{c1} = 60 + 2 \cdot 10,3 = 80,6 \text{ мм.} \quad (2.20)$$

Для решения задачи проектирования привода инструментального блока используем мотор шпиндель, так как он обеспечивает компактность. Основные размеры для которого были рассчитаны выше и указаны на рисунке 2.2.

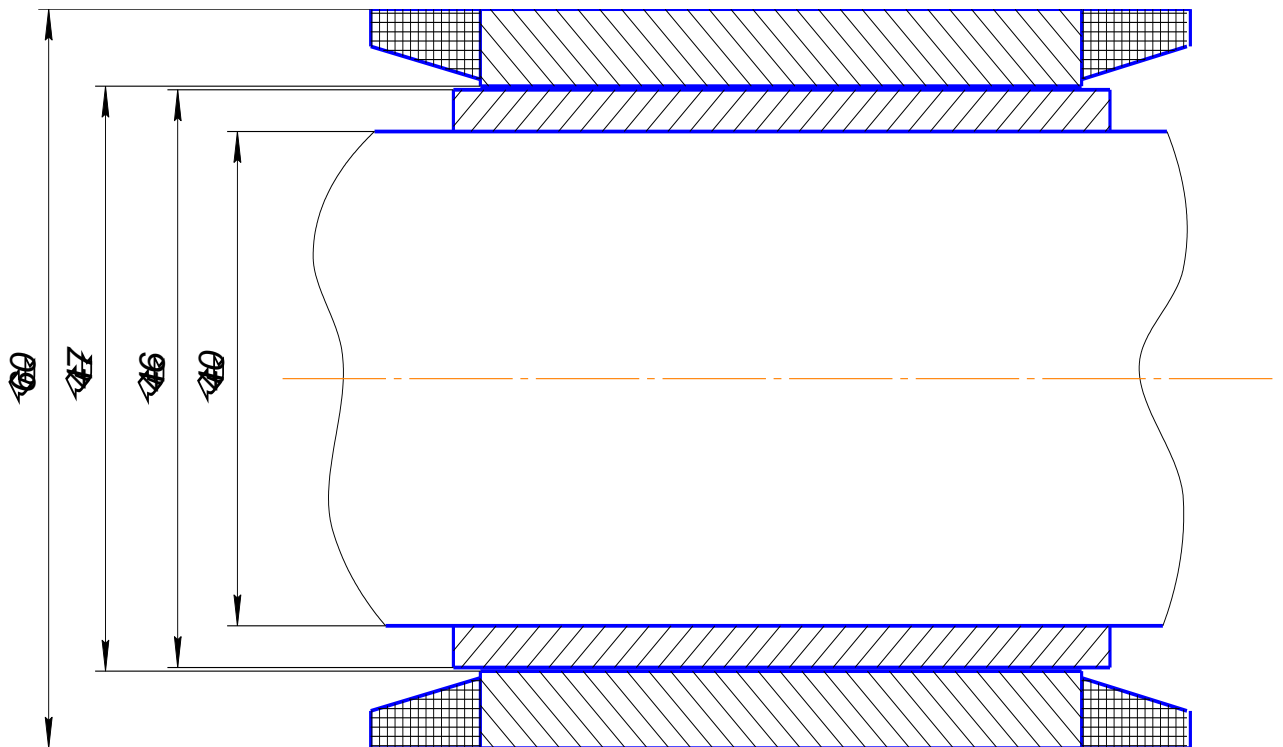


Рисунок 2.2 - Схема электродвигателя



- Диаметр вала 40мм;
- Наружный диаметр ротора 46мм;
- Внутренний диаметр статора 47мм;
- Наружный диаметр статора 60мм.

## 2.2. Расчёт вала и подшипников мотор шпинделя

### 2.2.1 Расчёт вала

Расчет будем вести в программе APM WinMachine. При расчёте режимов резания максимальный крутящий момент получился равный  $M_{кр} = 185 \text{ Н} \cdot \text{м}$

Чтобы построить эпюры в программе, следует построить конструкцию шпинделя и приложить нагрузки, как показано на рисунке 2.3. Крутящие моменты прикладываем в двух точках. Первая точка, это середина соединения шпинделя с валом оправки (5 мм от левого конца шпинделя). Вторая точка приложения это середина ротора (109 мм от левого конца шпинделя).

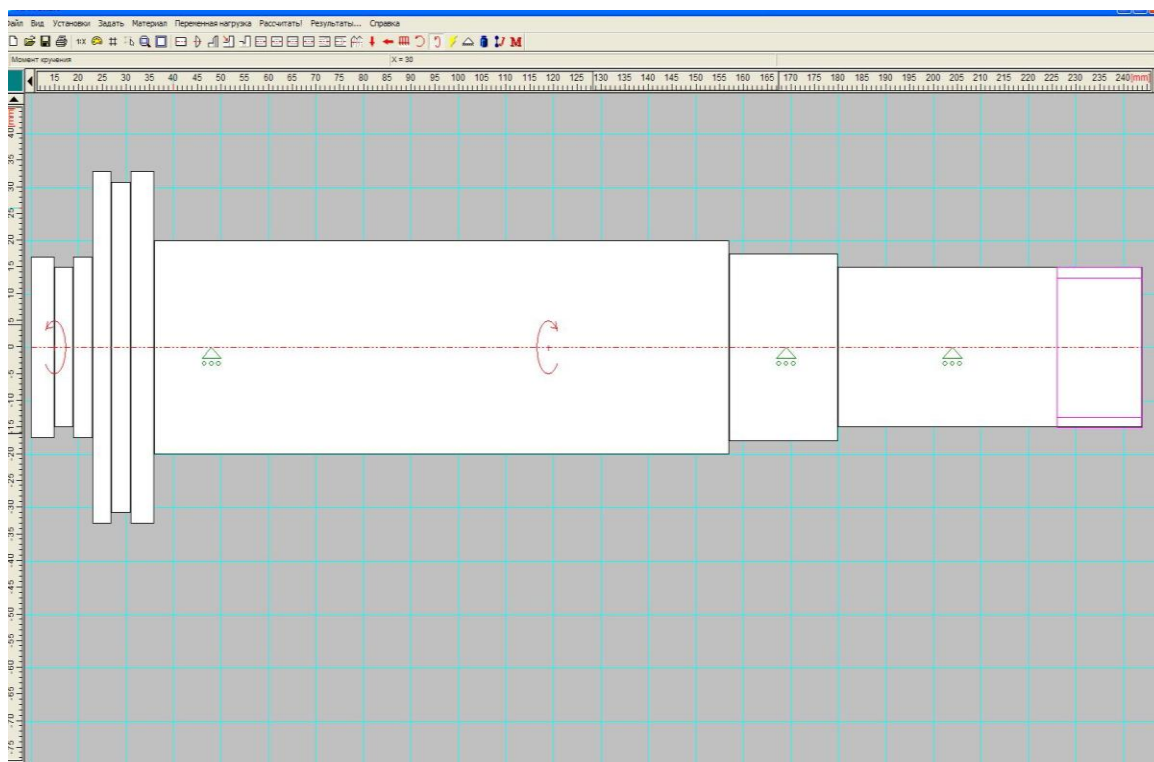


Рисунок 2.3 - Схема нагружения шпинделя

Получили 4 эпюры: эпюру момента кручения, эпюру распределения напряжения, эпюру угла кручения и эпюру усталостной прочности.

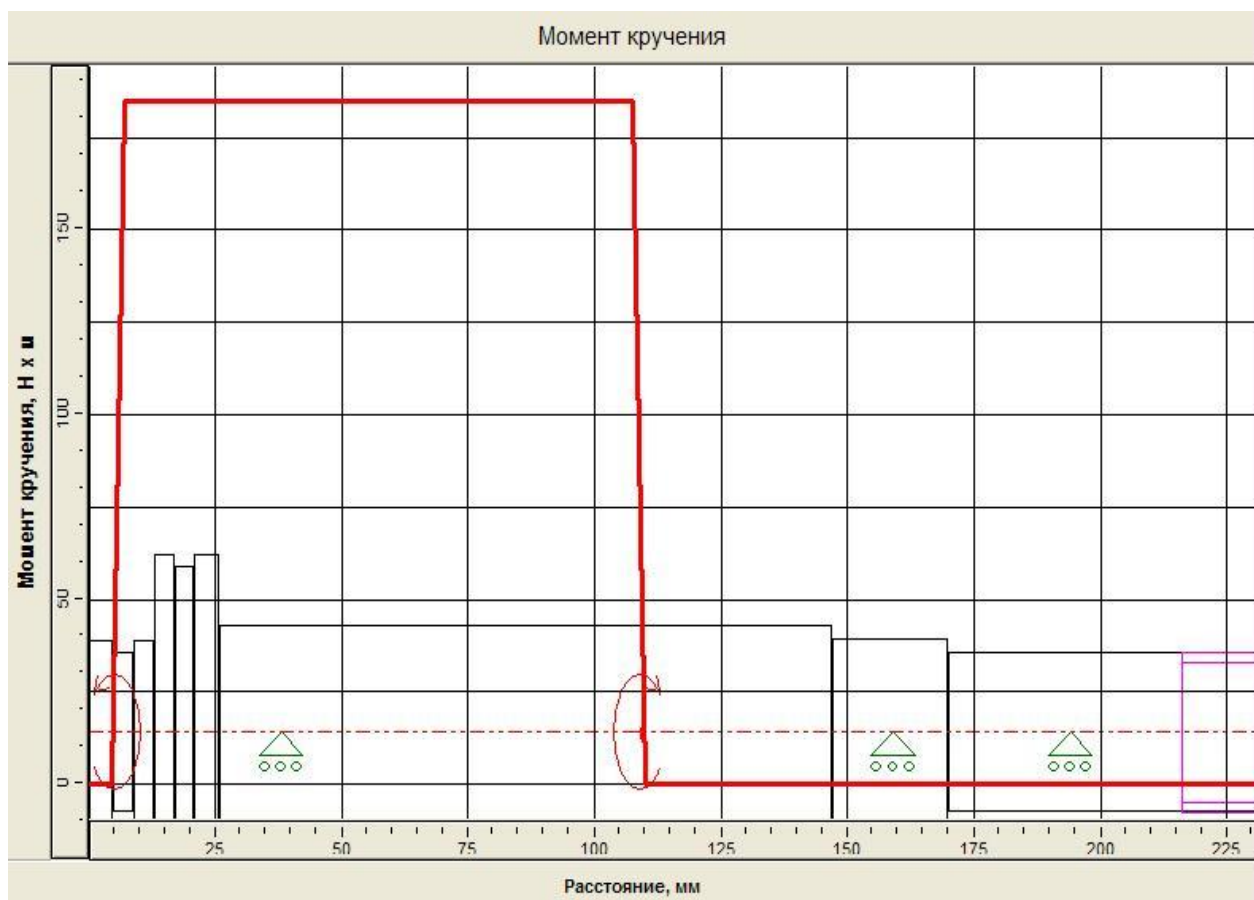


Рисунок 2.3 - Эпюра момента кручения шпинделя

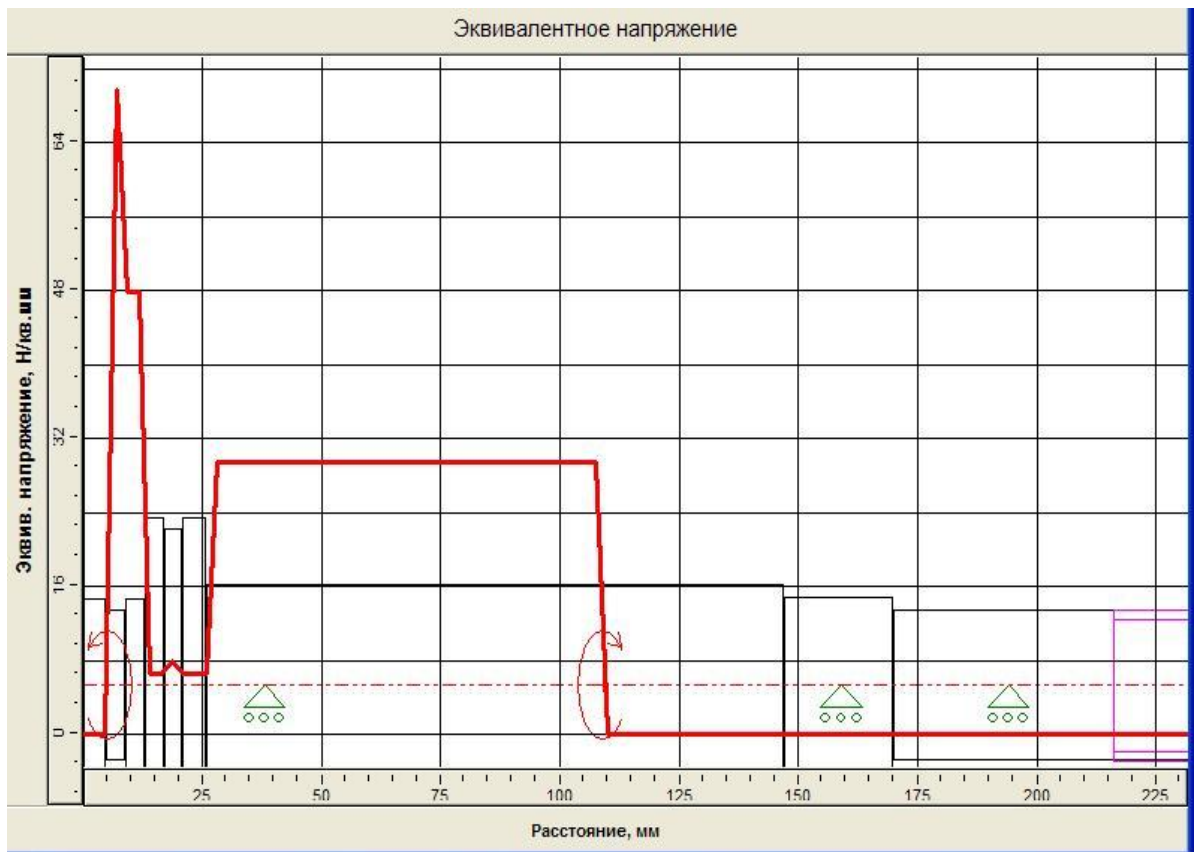


Рисунок 2.4 - Эпюра распределения напряжения на шпинделе

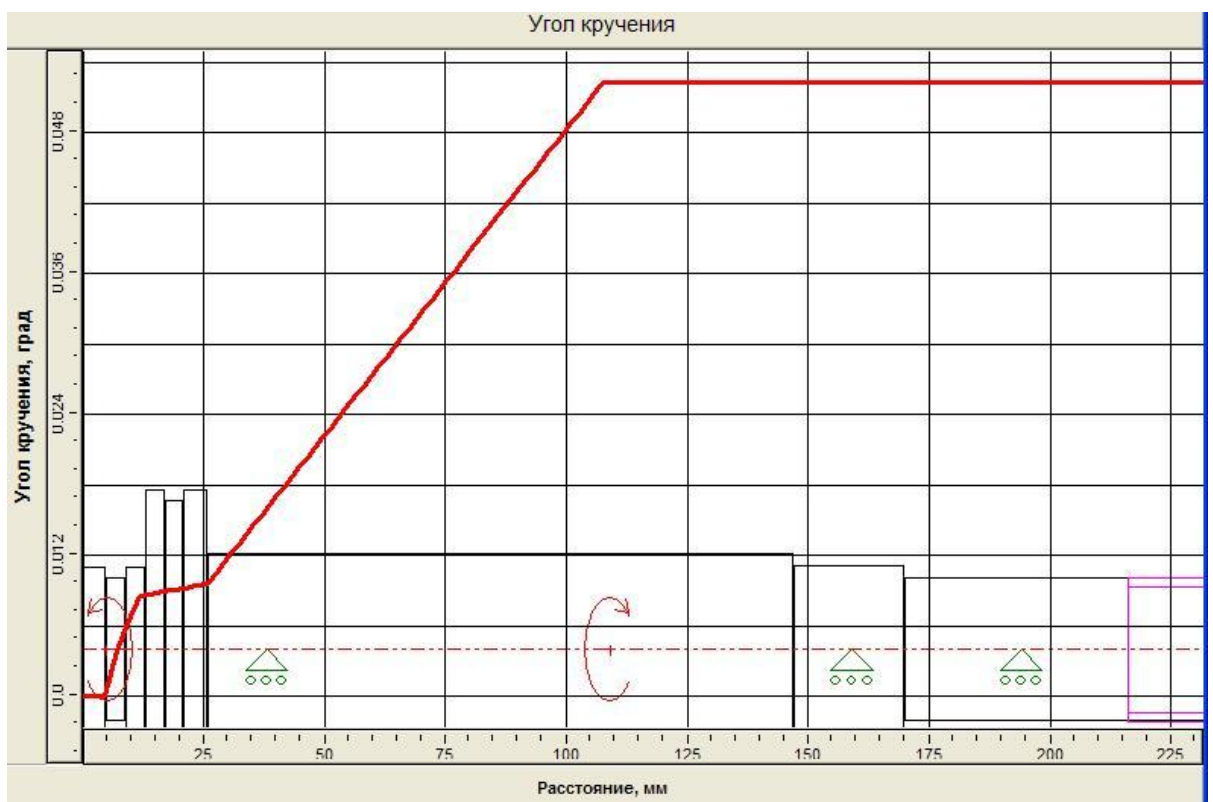


Рисунок 2.5 - Эпюра угла кручения шпинделя

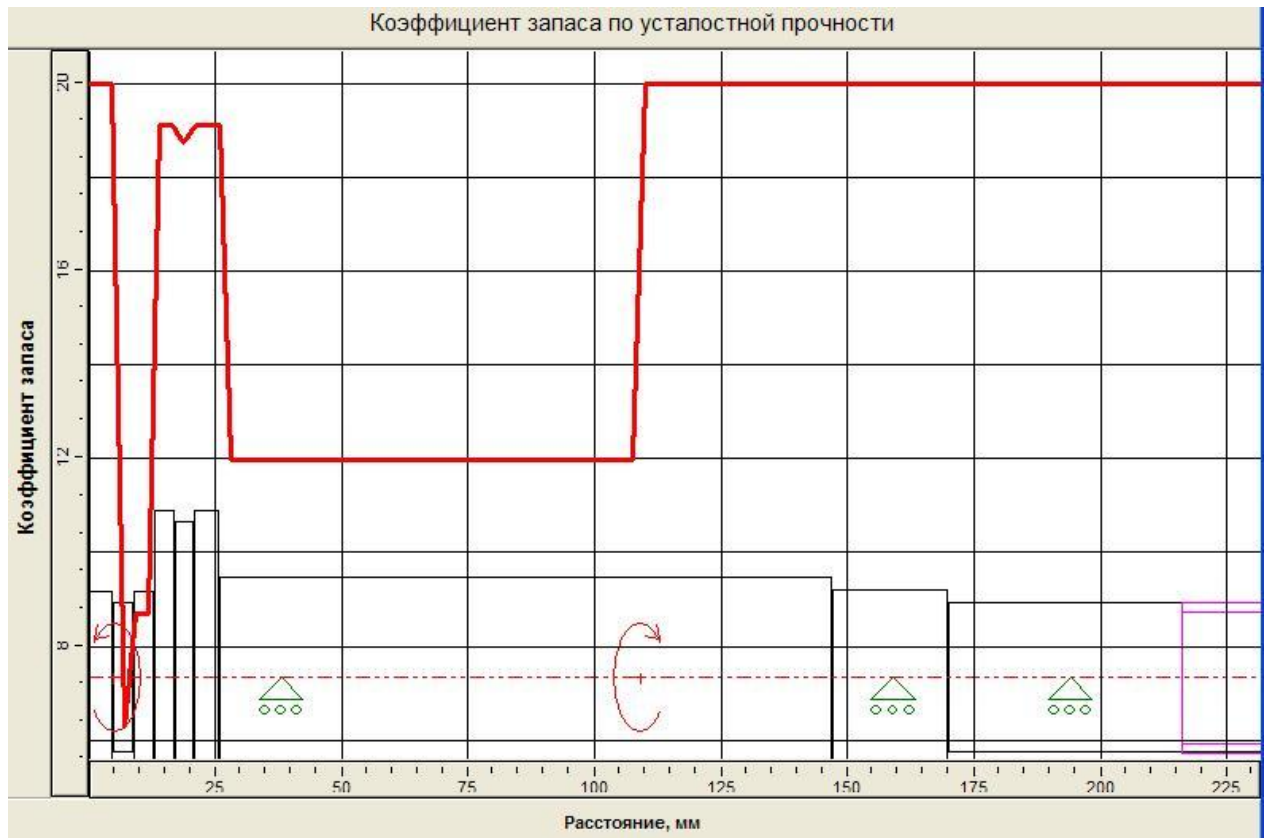


Рисунок 2.6 - Эпюра усталостной прочности шпинделя

Усталостная прочность считается обеспеченной, если коэффициент запаса прочности в любой точке вала

$$s \geq [s],$$

где допускаемое значение  $[s]=1,5 \dots 2,5$ . Условие выполняется.

Углы наклона оси вала в опорах не должны превышать:

0,143° для цилиндрических роликоподшипников;

0,0916° для конических роликоподшипников;

0,286° для однорядных шарикоподшипников;

2,86° для сферических шарикоподшипников.

В нашем случае условие выполняется, так как допуск на углы не превышают 0,060°.

Порядковый Номер	Частота [рад/с]	Частота [Гц]
1	36462.4975	5803.1867
2	60249.7681	9589.0484
3	85302.9299	13576.3830
4	181125.4914	28827.0173
5	342211.3003	54464.6200

Порядковый Номер	Частота [рад/с]	Частота [Гц]
1	42312.3642	6734.2219
2	75038.6244	11942.7680
3	122633.8672	19517.7862

Рисунок 2.7 - Динамические характеристики

Вывод: вал соответствует техническим требованиям.

### 2.2.2 Расчёт реакции в опорах шпинделя

Принимаем подшипники типов 8306H, 3182107 и 3182108.

Рассчитаем жесткость выбранных подшипников в опорах шпиндельного узла. Для этого в программе APM WinMachine рассчитаем максимальное радиальное смещение каждого подшипника.

Подшипник 3182108 – ненагруженный с действующей радиальной силой 632 Н. Результаты расчёта представлены на рисунке 2.8.

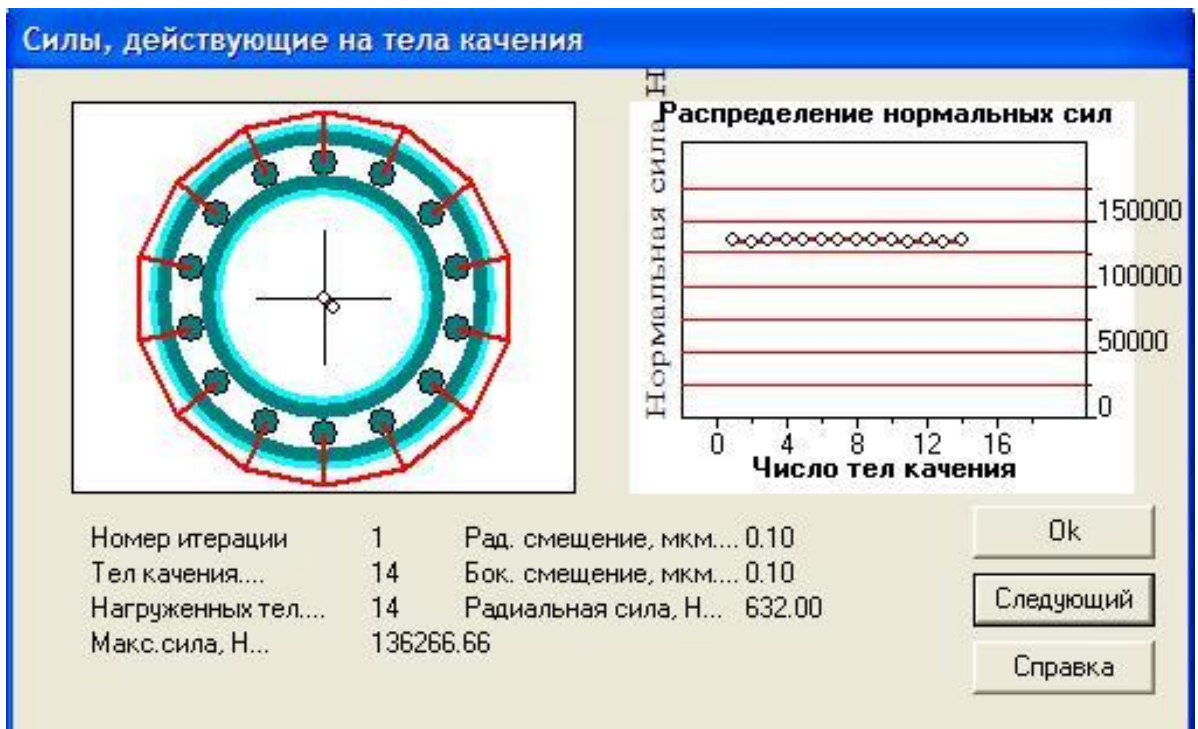


Рисунок 2.8 – Силы, действующие на подшипник 3182108

Подшипник 3182107 – нагруженный с действующей радиальной силой 632 Н. Результаты расчета представлены на рисунке 2.9.

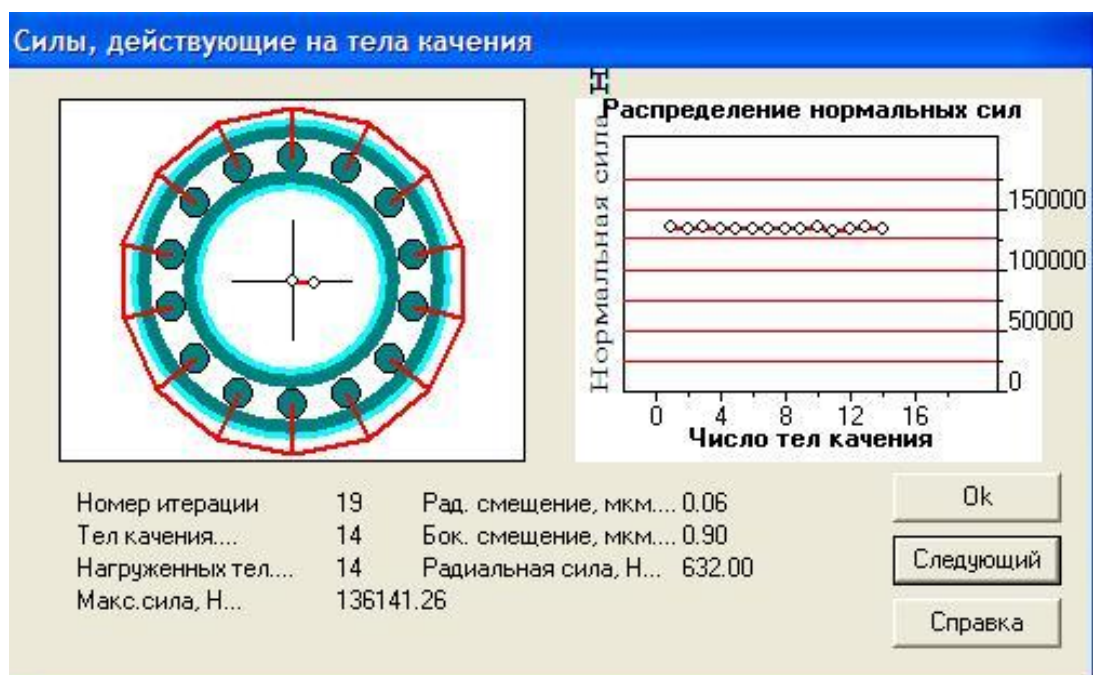


Рисунок 2.9 – Силы, действующие на подшипник 3182107



Подшипник 8306Н – ненагруженный с действующей радиальной силой 632 Н. Результаты расчета представлены на рисунке 2.10.



Рисунок 2.10 – Силы, действующие на подшипник 8306Н

Вывод: в результате расчетов были получены графики распределения нормальных сил в подшипниках и максимальное радиальное смещение, которое не превышает допустимое значение 0,10 мкм.

### 2.3 Описание работы привода инструментального блока

Конструкция разработанного мотора шпинделя представлена на рисунке 2.11. На шпиндель 4 крепится ротор 10. Шпиндель с ротором располагаются в корпусе привода 1, внутри которого крепится статор 9. Шпиндель вращается на подшипниках 22, 24 и 18. Слева на шпинделе устанавливается уплотнение 22, а также крышка 2, которая крепится болтом 17 и шайбой 21. Между крышкой и шпинделем устанавливают уплотнение 20.

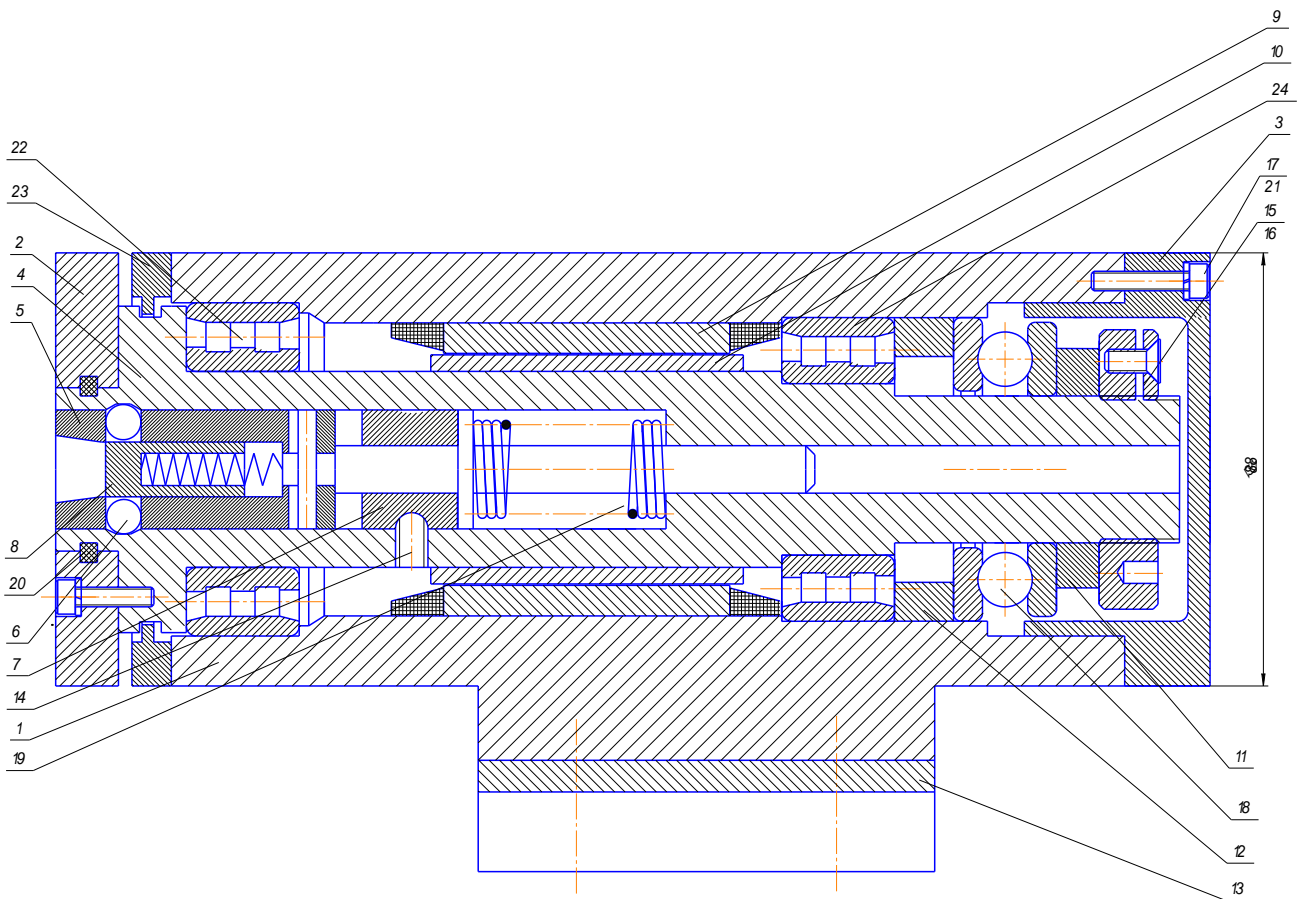


Рисунок 2.11 - Конструкция привода инструментального блока

Справа между подшипниками 24 и 18 ставится втулка 12, а между подшипником 18 и гайкой 15 ставят втулку 11. Крышка 3 крепится болтом 17 и шайбой 21.

Во внутреннем отверстии шпинделя установлен шариковый захват инструмента, состоящий из втулки 5, фиксатора 8 с пружиной. Установка инструментального блока в корпус шпинделя производится при перемещении револьверной головки в крайнее левое положение. При этом револьверная головка выходит на небольшое расстояние из привода, потом следует переключение и хвостовик инструментального блока оказывается напротив привода. При обратном ходе револьверной головки обратно в привод, хвостовик инструмента выталкивает фиксатор 8, шарики 6 попадают в кольцевую канавку хвостовика и предварительно сжатая пружина 19 затягивает инструментальный блок в конус шпинделя.



## Глава 3 Разработка узла вращения осевого инструмента

### 3.1 Исходные данные для проектирования

На станке 16Б16Т1С1 установлена револьверная головка, показанная на рисунке 3.1. Это шестипозиционная головка.

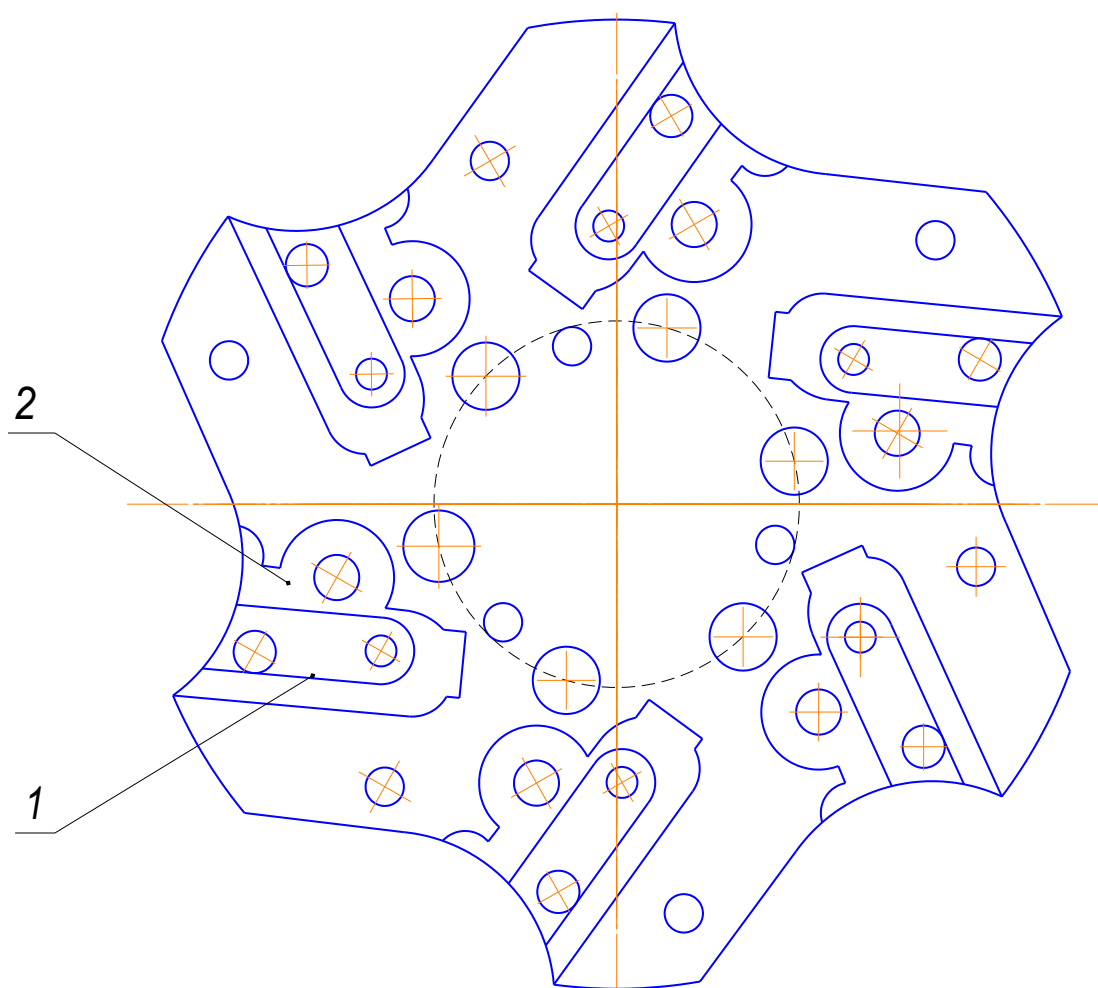


Рисунок 3.1 - Револьверная головка

Инструмент в данной головке фиксируется методом клинового крепления, как показано на рисунке 3.2., где 1 – инструмент, 2 – клин. Также в револьверной головке присутствуют отверстия для крепления болтами. Они

находятся как на внешней стороне, так и на торце револьверной головки. Проектируемую оправку следует расположить на торце головки и закрепить болтами в двух отверстиях, как показано на рисунке 3.3. и 3.4.

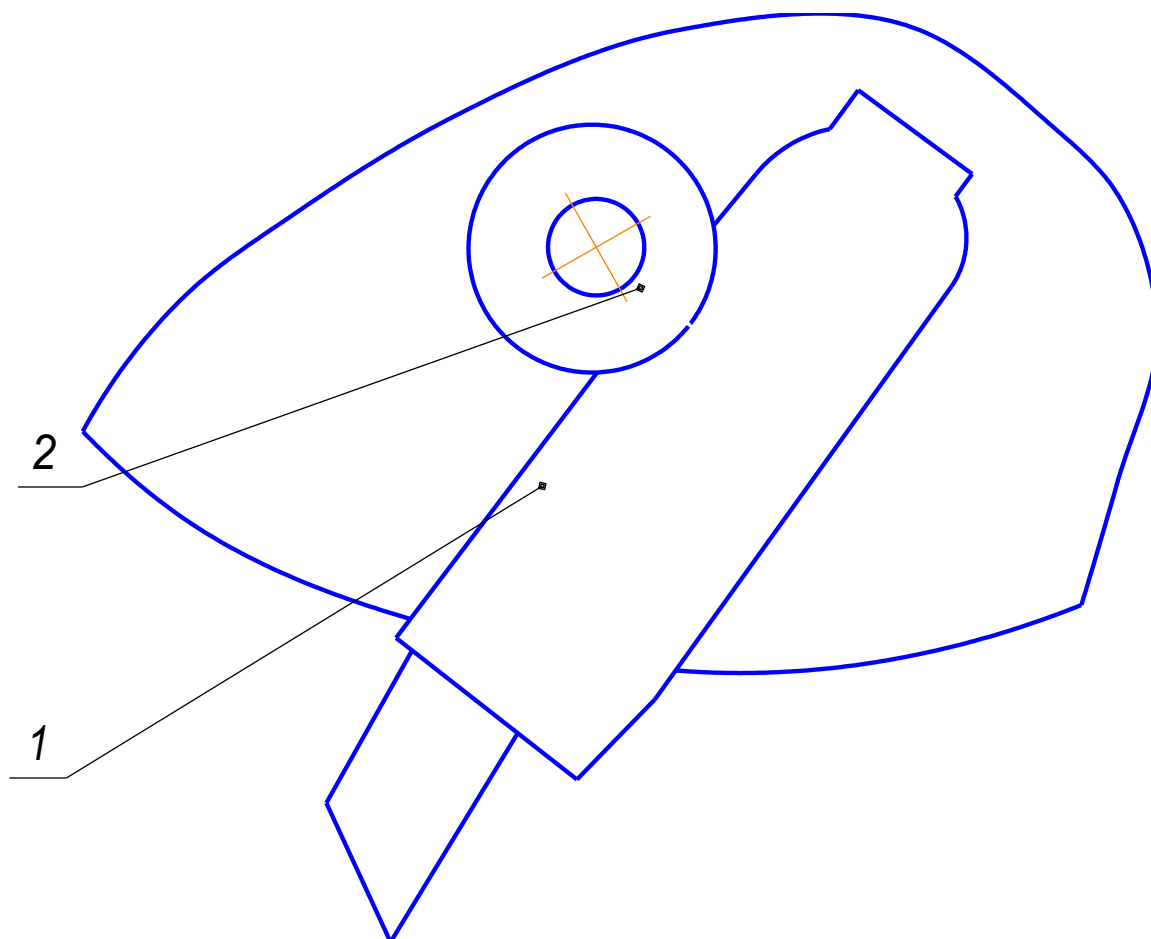


Рисунок 3.2 - Схема крепления инструмента в револьверной головке

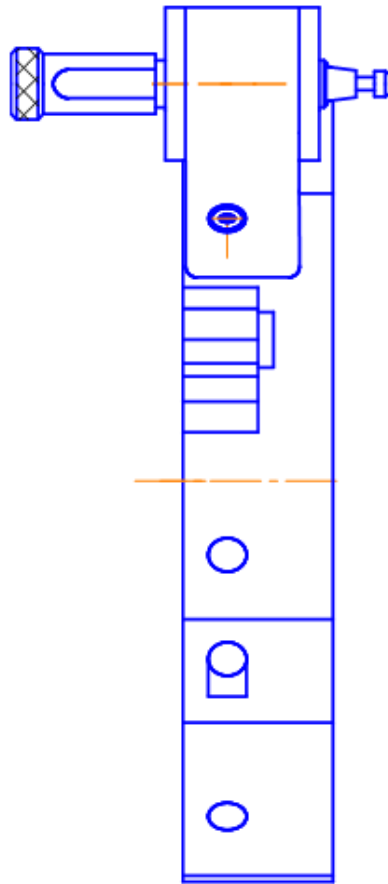


Рисунок 3.3 - Схема крепления инструментального блока на револьверной головке, вид с торца

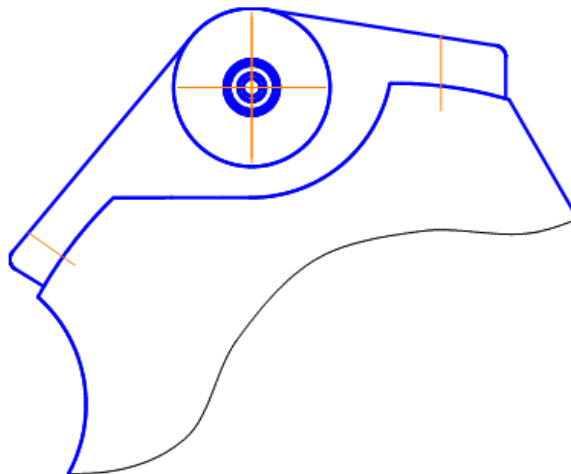


Рисунок 3.4 - Схема крепления инструментального блока на револьверной головке, вид спереди

## 3.2 Расчёт вала и подшипников инструментального блока.

### 3.2.1 Расчёт вала инструментального блока.

Расчет будем вести в программе APM WinMachine. При расчёте режимов резания окружная сила  $P_Z$  получилась равной 1245 Н, осевая сила  $P_X$  получилась равной 632 Н.

Чтобы построить эпюры в программе, следует построить конструкцию вала и приложить нагрузки, как показано на рисунке 3.5. Крутящие моменты прикладываем в двух точках. Первая точка это начало вала. Вторая точка, это середина соединения шпинделя с валом оправки. Так же обозначим силы  $P_Z$  и  $P_X$  а также изгибающий момент.

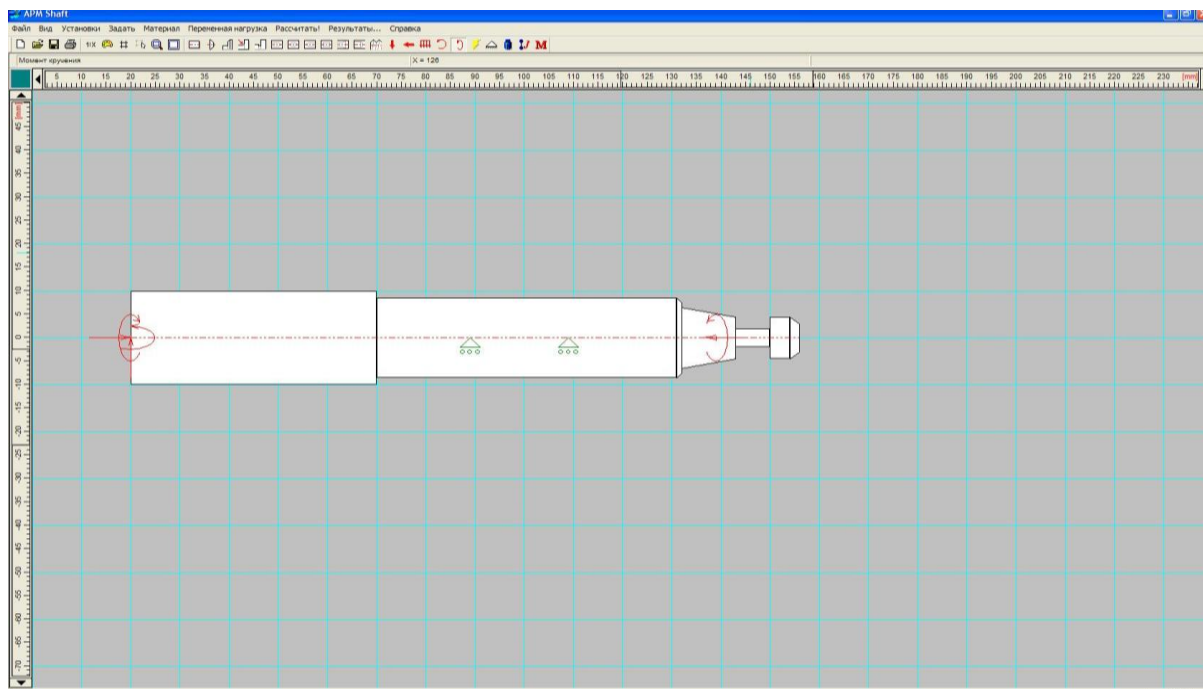


Рисунок 3.5 - Схема нагружения вала

Получили эпюры: эпюру изгибающего момента, эпюры поперечных сил, эпюры перемещений, эпюру момента кручения, эпюру распределения напряжения, эпюру угла кручения и эпюру усталостной прочности.

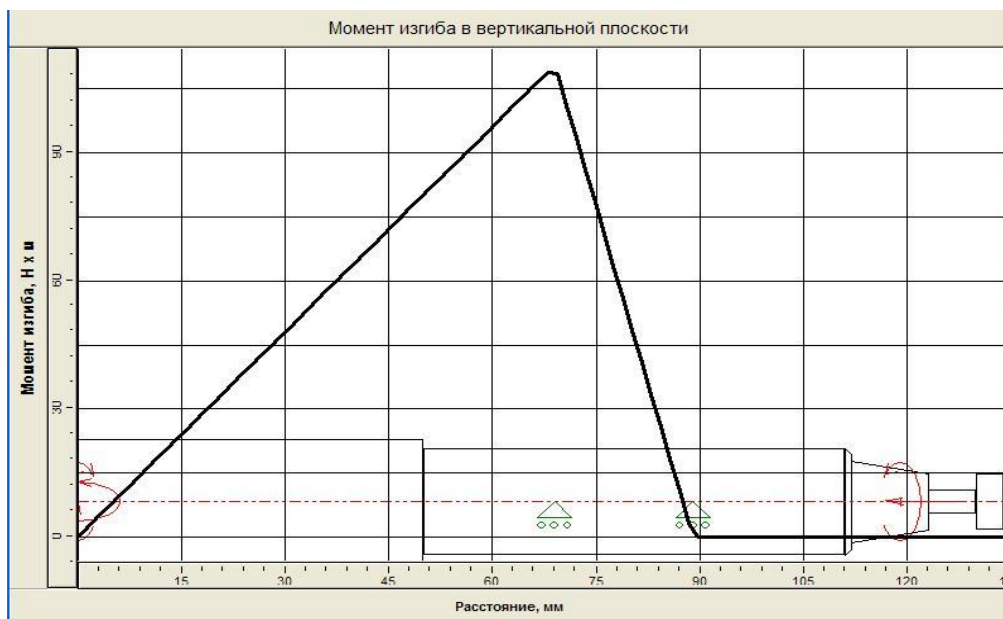


Рисунок 3.6 - Эпюра момента изгиба вала в вертикальной плоскости

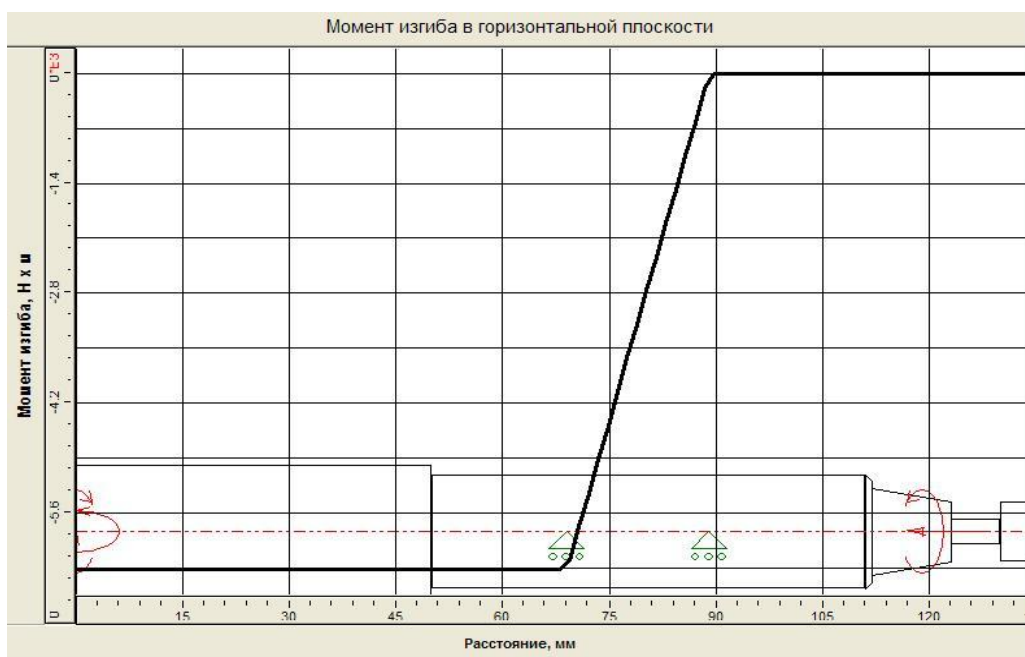


Рисунок 3.7 - Эпюра момента изгиба вала в горизонтальной плоскости

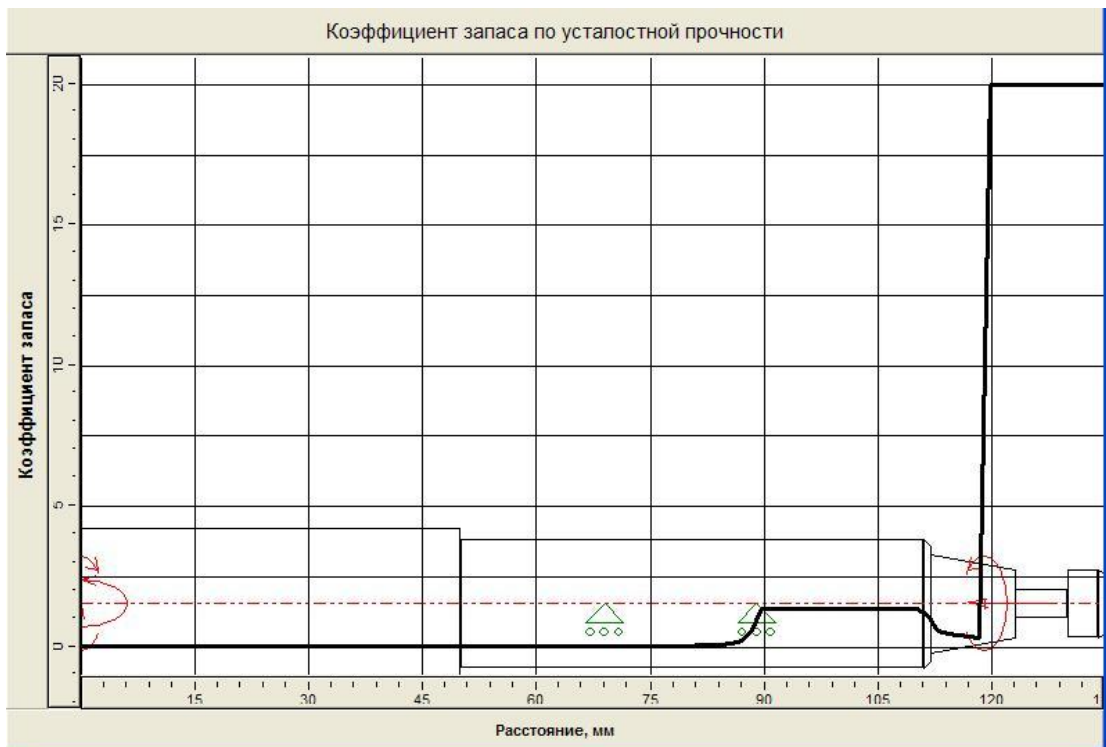


Рисунок 3.8 - Эпюра коэффициента запаса по усталостной прочности

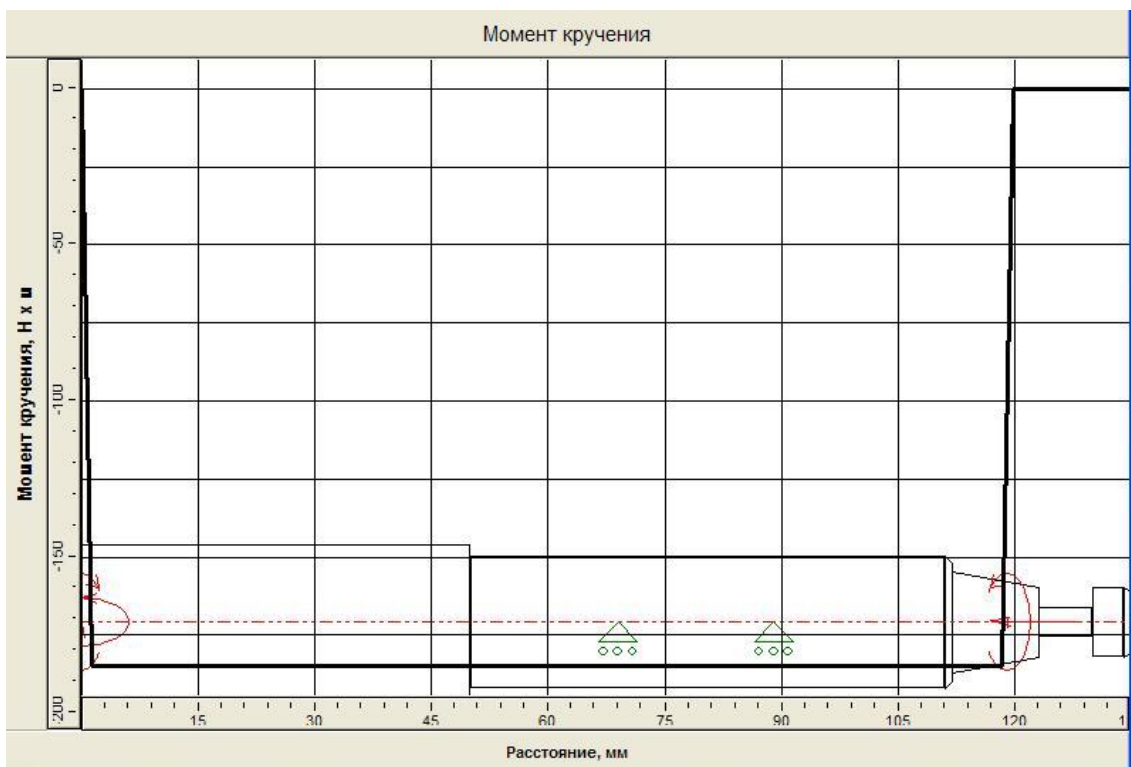


Рисунок 3.9 - Эпюра момента кручения

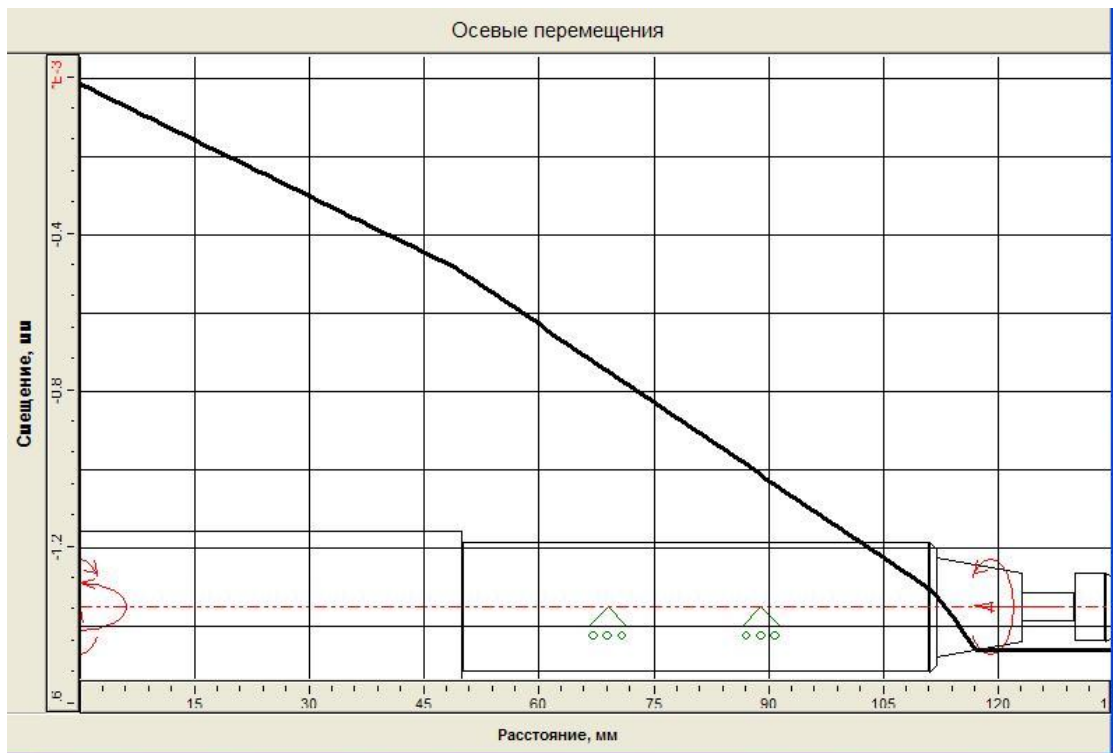


Рисунок 3.10 - Эюра осевых перемещений

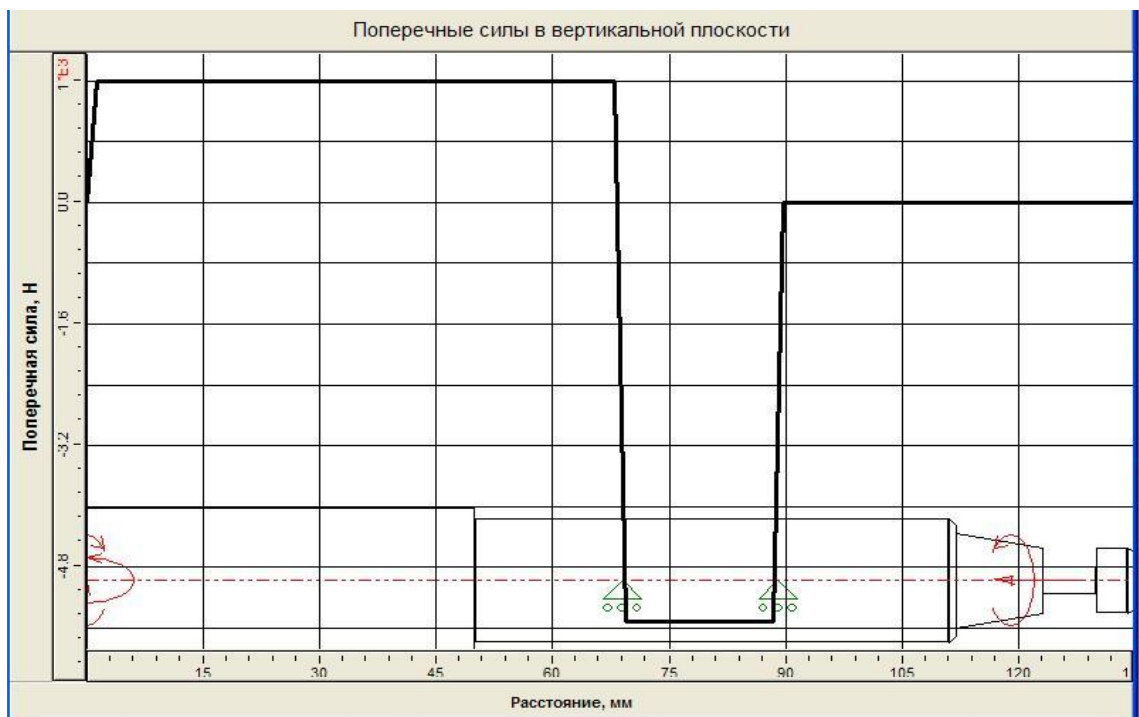


Рисунок 3.11 - Эюра поперечных сил в вертикальной плоскости

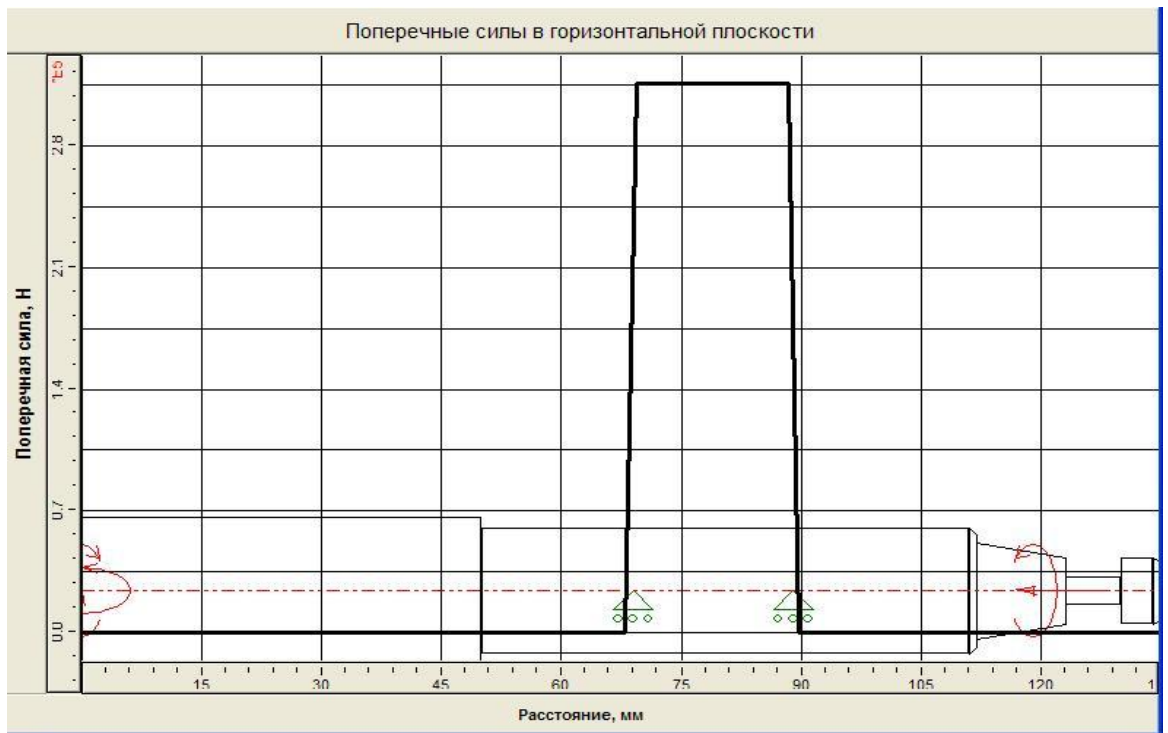


Рисунок 3.12 - Эпюра поперечных сил в горизонтальной плоскости

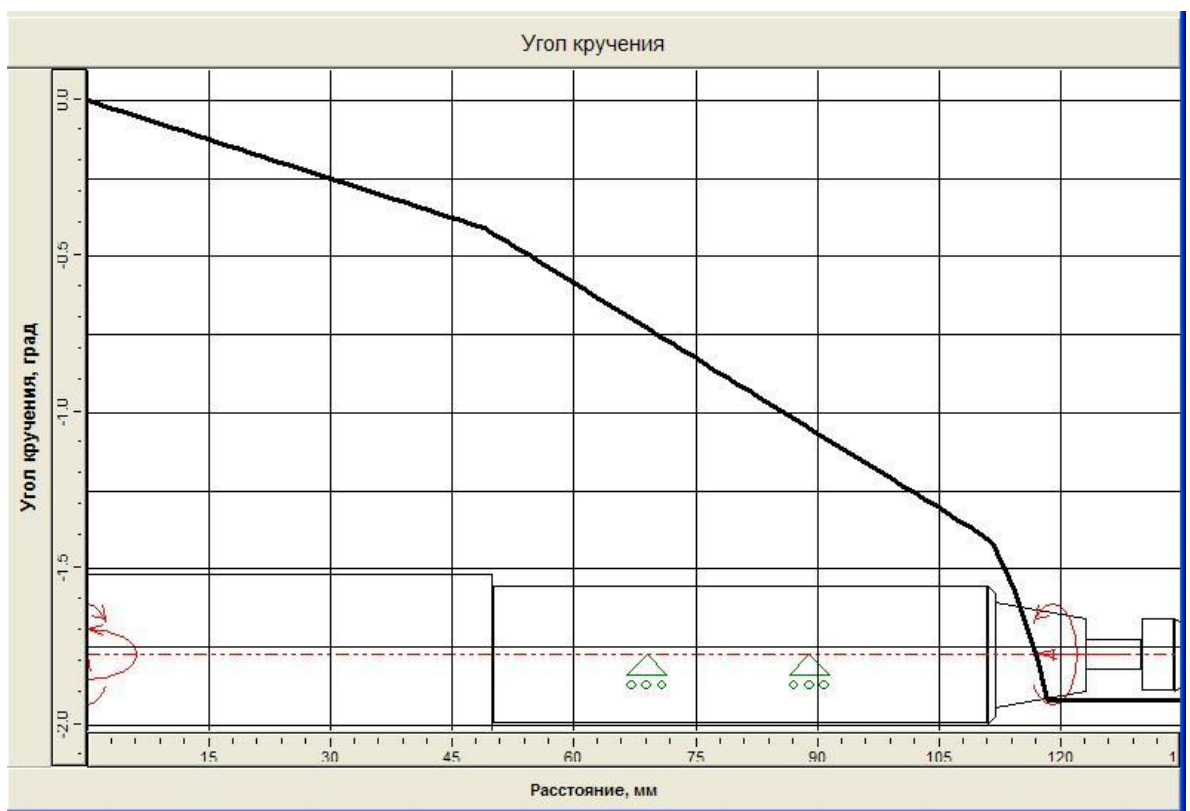


Рисунок 3.13 - Эпюра угла кручения



Из эпюры момента изгиба вала в вертикальной плоскости видим, что максимальный момент достигается в левой опоре. Из эпюры момента изгиба в горизонтальной плоскости видим, что максимальный момент достигается в правой части вала, начиная с правой опоры. Из эпюр коэффициента запаса по усталостной прочности, осевых сил и момента кручения видим, что максимальные значения достигаются на хвостовике. Из эпюры осевых перемещений, перемещения в вертикальной плоскости, угла кручения и углов изгиба в горизонтальной плоскости видно, что максимальное перемещение достигается на вылете оправки. Из эпюры поперечных сил в вертикальной плоскости видно, что максимальные значения находятся слева и справа от опор. В горизонтальной же плоскости наоборот. Из эпюры эквивалентного напряжения видно, что максимальные значения достигаются в центральной части вала, между утолщением и левой опорой.

Усталостная прочность считается обеспеченной, если коэффициент запаса прочности в любой точке вала

$$s \geq [s],$$

где допускаемое значение  $[s]=1,5 \dots 2,5$ . Условие выполняется.

Углы наклона оси вала в опорах не должны превышать:

$0,143^{\circ}$  для цилиндрических роликоподшипников;

$0,0916^{\circ}$  для конических роликоподшипников;

$0,286^{\circ}$  для однорядных шарикоподшипников;

$2,86^{\circ}$  для сферических шарикоподшипников.

В нашем случае условие выполняется, так как допуск на углы не превышают  $0,0916^{\circ}$ .

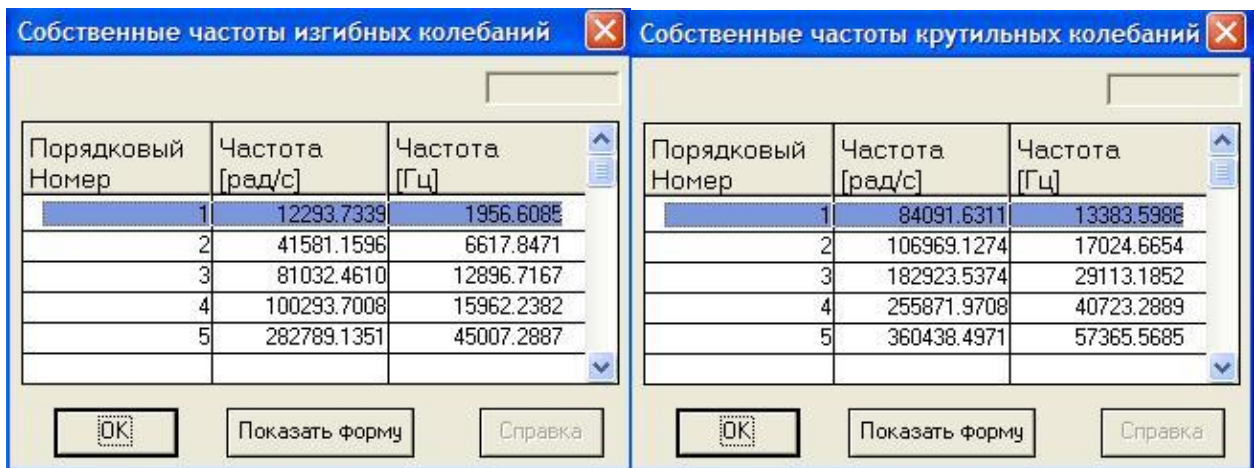


Рисунок 3.14 - Динамические характеристики

### 3.2.2 Расчёт реакции в опорах вала

Принимаем подшипники типов 7000103, 36102К. Рассчитаем жесткость выбранных подшипников в опорах шпиндельного узла. Для этого в программе APM WinMachine рассчитаем максимальное радиальное смещение каждого подшипника.

Подшипник 7000103 – ненагруженный с действующей радиальной силой 316080 Н. Результаты расчёта представлены на рисунке 3.15.



Рисунок 3.15 – Силы, действующие на подшипник 7000103

Подшипник 36102К – нагруженный с действующей радиальной силой 316048 Н. Результаты расчета представлены на рисунке 3.16.



Рисунок 3.16 - Силы действующие на подшипник 36102К

Вывод: В результате расчётов получили допустимые значения отклонений радиальных смещений.

## Глава 4 Разработка технических решений, обеспечивающих расширение технологических возможностей станка

### 4.1. Описание технических решений

В результате применения спроектированного инструментального блока появляется возможность обработки шпоночных пазов, а также сверление отверстий несоосных с осью приспособления, а также нарезания резьб в этих отверстиях. Далее проработаем каждую из этих операций, рассчитаем необходимые режимы резания и изобразим наладки.

#### 4.1.1 Фрезерование продольного шпоночного паза

Для фрезерования шпоночного паза выбираем шпоночную фрезу по ГОСТ 9140-78.

$D=20$  мм – диаметр фрезы;

$l=22$  мм – длина рабочей части фрезы;

$L=88$  мм – общая длина фрезы

$t=10$  мм – глубина фрезерования

$B=20$  мм – ширина фрезерования

По таблице 34 в [1] для обработки паза на валу из материала Сталь 45 выбираем подачу

$S = 0,31$  мм/об.

1) Скорость резания  $U$  рассчитывается по формуле

$$U = \frac{C_v D^q}{T^m \cdot t^x S_z^y \cdot B^u \cdot Z^p} \cdot K_v \frac{м}{мин}; \quad (4.1)$$

где:  $C_v, x, m, y, u, p$ : – коэффициент и показатели степени для конкретных

условий обработки а именно: обрабатываемый материал имеет свойства  $\sigma_B = 600$ . По рекомендациям в [1] выбираем следующие коэффициенты:  $C_v = 12, q = 0,3, m = 0,26, y = 0,25, x = 0,3, u = 0, p = 0$ ; T – период стойкости инструмента, в данном случае 60 минут.

2) Поправочный коэффициент  $K_v$  – представляет собой произведение ряда коэффициентов учитывающих фактическое усилие резания, и рассчитывается по формуле:

$$K_v = K_{mv} \cdot K_{nv} \cdot K_{uv}; \quad (4.2)$$

где:

$K_{nv} = 1$ ;– коэффициент, учитывающий состояние поверхности.

$K_{uv} = 1$ ;– коэффициент, учитывающий материал инструмента.

$K_{mv} = 1,1$ ;– коэффициент, учитывающий влияние материала заготовки.

$$K_v = 1 \cdot 1 \cdot 1,1 = 1,1;$$

3) Найдем величину скорости резания  $V$ :

$$V = \frac{12 \cdot 20^{0.3}}{60^{0.26} \cdot 10^{0.3} \cdot 0.31^{0.25} \cdot 20^0 \cdot 2^0} \cdot 1,1 = 7,51 \text{ м/мин}$$

4) Частоту вращения n рассчитаем по формуле:

$$n = \frac{1000 \cdot V}{\pi \cdot D} \text{ об/мин}; \quad (4.3)$$

где:

$D$  – диаметр фрезы, мм;

$U$  – скорость резания, м/мин.

$$n = \frac{1000 \cdot 7,51}{3,14 \cdot 20} = 119,5 \text{ об/мин};$$

Выбираем число оборотов для спроектированного механизма

$n=220$  об/мин

После чего уточняем скорость резания по формуле:

$$U = \frac{n \cdot \pi \cdot D}{1000} \text{ м/мин}; \quad (4.4)$$

где:

$D$  – диаметр фрезы, мм;

$n$  – число оборотов, об/мин.

Подставляя значения в формулу (4.4.) находим что, скорость  $U$  равна:

$$U = \frac{220 \cdot 3,14 \cdot 20}{1000} = 13,8 \text{ м/мин};$$

Принимаем скорость резания  $U$  равной:  $U=13,8 \text{ м/мин}$ ;

5) Рассчитаем окружную силу  $P_z$  по формуле:

$$P_z = \frac{10 \cdot C_p \cdot t^x \cdot s_z^y \cdot B^n \cdot z}{D^q \cdot n^w} K_{MP}; \quad (4.5)$$

где:  $C_p, q, y, x, w, K_{MP}$  коэффициент и показатели степени для конкретных условий обработки а именно: обрабатываемый материал Сталь 45  $\sigma_B = 600$  , материал режущей части инструмента P6M5. По рекомендациям в [8] выбираем следующие коэффициенты:

$$C_p = 68,2; x = 0,86; q = 0,86; y = 0,72; w = 0, K_{MP} = 0,94;$$

$$P_z = \frac{10 \cdot 68,2 \cdot 2^{0,86} \cdot 0,31^{0,72} \cdot 20^1 \cdot 2}{20^{0,86} \cdot 220^0} \cdot 0,94 = 1845,4H;$$

Из соотношений сил резания по рекомендациям в [8] найдём  $P_x, P_y, P_h$  и  $P_v$ .

$$P_x = P_z \cdot 0,5 = 1845,4 \cdot 0,5 = 922,7H;$$

$$P_v = P_z \cdot 0,9 = 1845,4 \cdot 0,9 = 1660,9H;$$

$$P_h = P_z \cdot 0,3 = 1845,4 \cdot 0,3 = 553,6H;$$

$$P_y = P_z \cdot 0,5 = 1845,4 \cdot 0,5 = 922,7H;$$

6) Угловая скорость рассчитывается по формуле:

$$\omega = \frac{\pi \cdot n}{30} = \frac{3,14 \cdot 220}{30} = 23 \text{ м/мин}; \quad (4.5)$$

7) Крутящий момент найдём по формуле:

$$M_{кр} = \frac{P_z \cdot D}{2 \cdot 100} H \cdot м; \quad (4.6)$$

$$M_{кр} = \frac{1845,4 \cdot 20}{2 \cdot 100} = 184,5H \cdot м;$$

8) Мощность резания найдём по формуле:

$$N_e = \frac{P_z \cdot V}{1020 \cdot 60} \text{кВт}; \quad (4.7)$$

$$N_e = \frac{269,7 \cdot 13,8}{1020 \cdot 60} = 0,06 \text{кВт};$$

9) Машинное время  $T_{\text{маш}}$  найдём по формуле:

$$T_{\text{маш}} = \frac{L \cdot i}{n \cdot S}; \quad (4.8)$$

где  $L$  – длина рабочего хода, равная в нашем случае:

$$L = 40 \text{ мм.}$$

$$T_{\text{маш}} = \frac{40 \cdot 3}{220 \cdot 0,31} = 1,63 \text{ мин};$$

Штучное время  $T_{\text{шт}}$  найдём по формуле:

$$T_{\text{шт}} = T_M + T_B + T_{\text{П-З}}; \quad (4.9)$$

где  $T_B = 0,839$  – вспомогательное время;

$T_{\text{П-З}} = 0,153$  – подготовительно – заготовительное время;

$T_M$  – машинное время.

Подставив исходные данные в формулу получим:

$$T_{\text{шт}} = 1,63 + 0,839 + 0,153 = 2,62 \text{ мин};$$



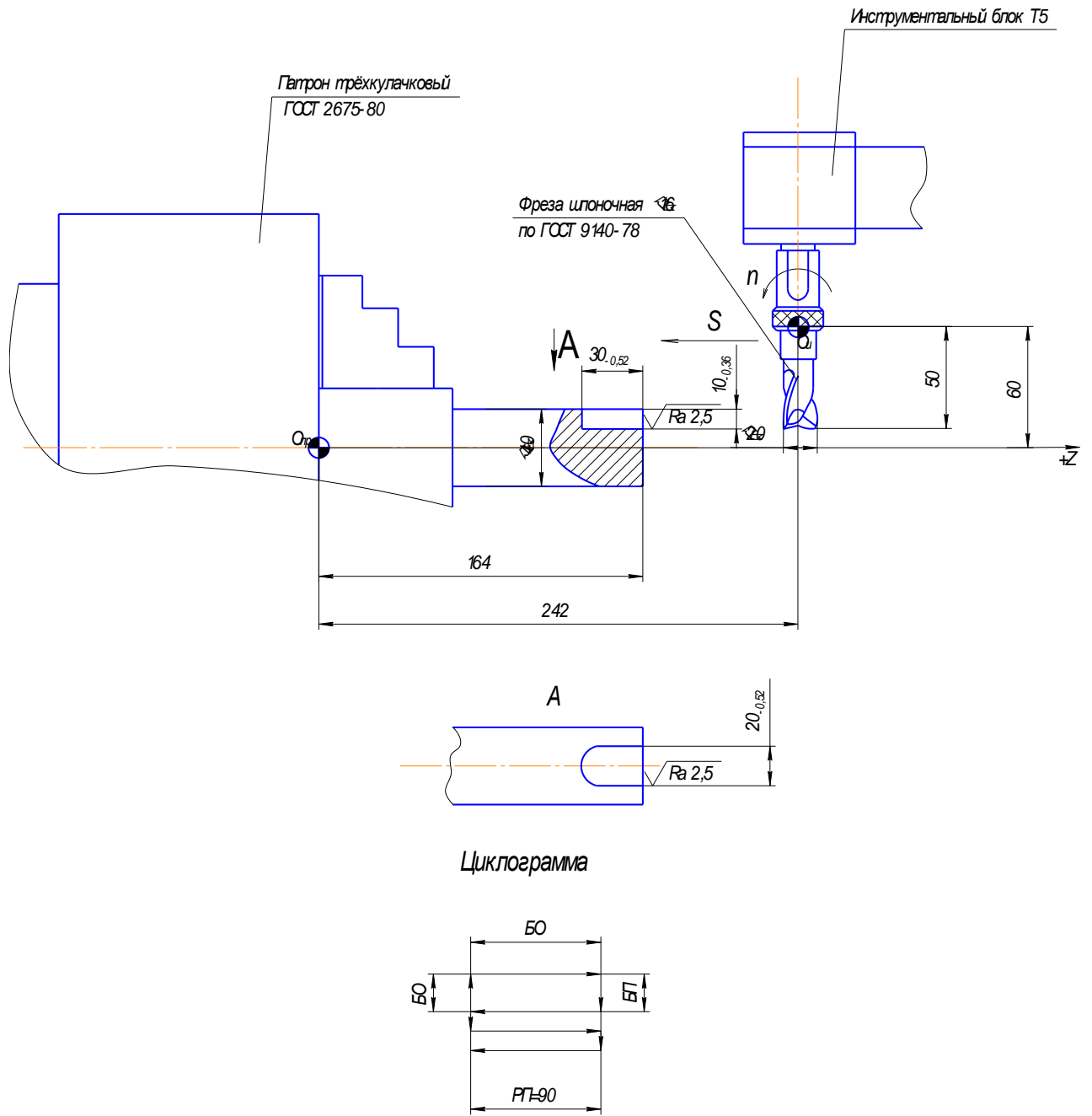


Рисунок 4.1 - Схема наладки фрезерования продольного шпоночного паза

#### 4.1.2 Фрезерование поперечного шпоночного паза.

Для фрезерования данного паза выбираем инструмент шпоночная фреза по ГОСТ 9140-78.

$D=16$  мм – диаметр фрезы;

$l=19$  мм – длина рабочей части фрезы;

$L=79$  мм – общая длина фрезы;

$t=10$  мм – глубина фрезерования;

$B=16$  мм – ширина фрезерования.

По таблице 34 в [1] для обработки паза на валу из материала Сталь 45 выбираем подачу

$S = 0,25$  мм/об.

1) Скорость резания  $U$  рассчитывается по формуле:

$$U = \frac{C_v D^q}{T^m \cdot t^x S_z^y \cdot B^u \cdot Z^p} \cdot K_v \text{ м/мин};$$

где:  $C_v, x, m, y, u, p$ : – коэффициент и показатели степени для конкретных условий обработки а именно: обрабатываемый материал имеет свойства  $\sigma_B = 600$ . По рекомендациям в [1] выбираем следующие коэффициенты:  $C_v = 12, q = 0,3, m = 0,26, y = 0,25, x = 0,3, u = 0, p = 0$ ;

$T$  – период стойкости инструмента, в данном случае 60 минут.

Поправочный коэффициент  $K_v$  – представляет собой произведение ряда коэффициентов учитывающих фактическое усилие резания, и рассчитывается по формуле:

$$K_v = K_{mv} \cdot K_{nv} \cdot K_{uv};$$

где:

$K_{nv} = 1$ ;– коэффициент, учитывающий состояние поверхности.

$K_{uv} = 1$ ;– коэффициент, учитывающий материал инструмента.

$K_{mv} = 1,1$ ;– коэффициент, учитывающий влияние материала заготовки.

$$K_v = 1 \cdot 1 \cdot 1,1 = 1,1;$$

Найдем величину скорости резания  $v$ :

$$v = \frac{12 \cdot 16^{0,3}}{60^{0,26} \cdot 10^{0,3} \cdot 0,25^{0,25} \cdot 16^0 \cdot 2^0} \cdot 1,1 = 7,4 \text{ м/мин}$$

2) Частоту вращения  $n$  рассчитаем по формуле:

$$n = \frac{1000 \cdot v}{\pi \cdot D} \text{ об/мин};$$

где:

$D$  – диаметр фрезы, мм;

$v$ – скорость резания, м/мин.

$$n = \frac{1000 \cdot 7,4}{3,14 \cdot 16} = 147,2 \text{ об/мин};$$

Выбираем число оборотов для спроектированного механизма:

$$n = 260 \text{ об/мин}$$

9) После чего уточняем скорость резания по формуле:

$$v = \frac{n \cdot \pi \cdot D}{1000} \text{ м/мин};$$

где:

$D$  – диаметр фрезы, мм;

$n$  – число оборотов, об/мин.

Подставляя значения в формулу находим что, скорость  $v$  равна:

$$v = \frac{260 \cdot 3,14 \cdot 16}{1000} = 13 \text{ м/мин};$$

Принимаем скорость резания  $v$  равную 13 мм/мин.

4) Рассчитаем окружную силу  $P_z$  по формуле:

$$P_z = \frac{10 \cdot C_p \cdot t^x \cdot s_z^y \cdot B^n \cdot z}{D^q \cdot n^w} K_{MP};$$

где:  $C_p, q, y, x, w, K_{MP}$  коэффициент и показатели степени для конкретных условий обработки а именно: обрабатываемый материал Сталь 45  $\sigma_B = 600$  , материал режущей части инструмента P6M5. По рекомендациям в [1] выбираем следующие коэффициенты:

$$C_p = 68,2; x = 0,86; q = 0,86; y = 0,72; w = 0, K_{MP} = 0,94;$$

$$P_z = \frac{10 \cdot 68,2 \cdot 2^{0,86} \cdot 0,25^{0,72} \cdot 16^1 \cdot 2}{16^{0,86} \cdot 260^0} \cdot 0,94 = 1264,5 \text{ Н};$$

Из соотношений сил резания по рекомендациям в [1] найдём  $P_x, P_y, P_h$  и  $P_v$ .

$$P_x = P_z \cdot 0,5 = 1264,5 \cdot 0,5 = 632,25 \text{ Н};$$

$$P_v = P_z \cdot 0,9 = 1264,5 \cdot 0,9 = 1138,05 \text{ Н};$$

$$P_h = P_z \cdot 0,3 = 1264,5 \cdot 0,3 = 379,35 \text{ Н};$$

$$P_y = P_z \cdot 0,5 = 1264,5 \cdot 0,5 = 632,25 \text{ Н};$$

10) Угловая скорость рассчитывается по формуле:

$$\omega = \frac{\pi \cdot n}{30} = \frac{3,14 \cdot 260}{30} = 27,2 \text{ м/мин};$$

11) Крутящий момент найдём по формуле:

$$M_{кр} = \frac{P_z \cdot D}{2 \cdot 100} H \cdot м;$$

$$M_{кр} = \frac{1264,5 \cdot 16}{2 \cdot 100} = 101,16 H \cdot м;$$

12) Мощность резания найдём по формуле:

$$N_e = \frac{P_z \cdot V}{1020 \cdot 60} \text{ кВт};$$

$$N_e = \frac{261,4 \cdot 13}{1020 \cdot 60} = 0,27 \text{ кВт};$$

12) Машинное время T маш найдём по формуле:

$$T_{маш} = \frac{L \cdot i}{n \cdot S};$$

где L – длина рабочего хода, равная в нашем случае:

$$L = 40 \text{ мм.}$$

$$T_{маш} = \frac{30 \cdot 3}{260 \cdot 0,25} = 1,38 \text{ мин};$$

13) Штучное время Tшт найдём по формуле:

$$T_{шт} = T_M + T_B + T_{П-3};$$

где  $T_B = 0,839$  – вспомогательное время;

$T_{П-3} = 0,153$  – подготовительно – заготовительное время;

$T_M$  – машинное время.

Подставив исходные данные в формулу получим:

$$T_{шт} = 1,38 + 0,839 + 0,153 = 2,372 \text{ мин};$$

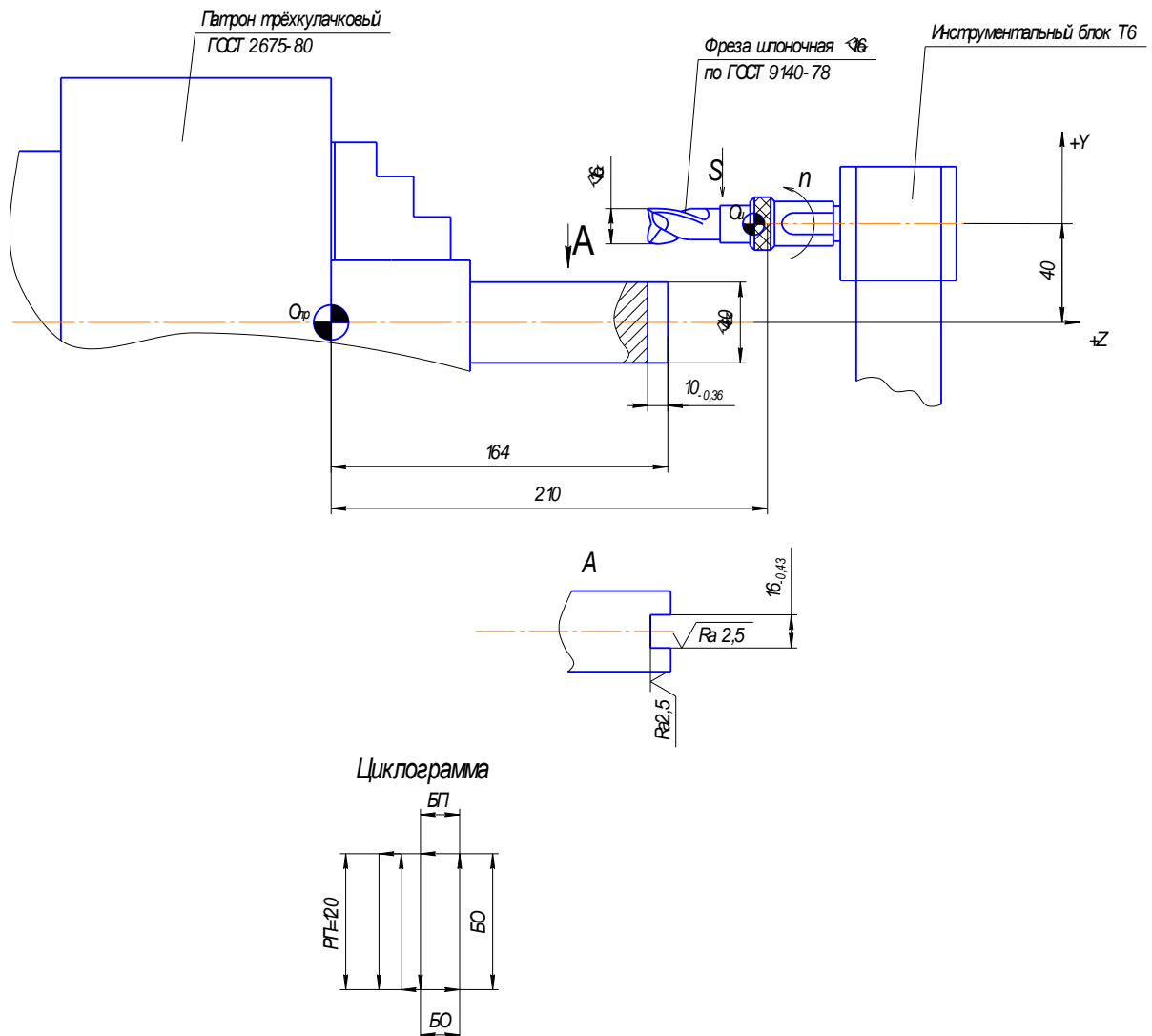


Рисунок 4.2 - Схема наладки фрезерования поперечного шпоночного паза

### 4.1.3 Сверление отверстия.

Для обработки отверстий выберем инструмент сверло спиральное из быстрорежущей стали Р6М5 с цилиндрическим хвостовиком короткой серии по ГОСТ 4010-77 с размерами:

$d=10$  мм – диаметр сверла,

$L=100$  мм – длина сверла,

$l=55$  мм – длина рабочей части сверла.

Глубина резания:  $t = 47$  мм.

По таблице 25 в [1] для обработки отверстия в СЧ12 выбираем подачу

$S = 0,66$  мм/об.

Скорость резания  $U$  рассчитывается по формуле

$$U = \frac{C_v D^q}{T^m \cdot S^y} \cdot K_v \text{ м/мин};$$

где:  $C_{v,x,m,y}$  – коэффициент и показатели степени для конкретных условий обработки а именно: обрабатываемый материал серый чугун НВ190, материал режущей части инструмента Р6М5. По рекомендациям в [1] выбираем следующие коэффициенты:  $C_v = 14,7$ ,  $q = 0,25$ ,  $m = 0,125$ ,  $y = 0,55$ ;

$T$  – период стойкости инструмента, в данном случае 45 минут.

Поправочный коэффициент  $K_v$  – представляет собой произведение ряда коэффициентов учитывающих фактическое усилие резания, и рассчитывается по формуле:

$$K_v = K_{mv} \cdot K_{nv} \cdot K_{nv};$$

где:  $K_{nv} = 1$ ; – коэффициент, учитывающий состояние поверхности.

$K_{uv} = 0,3$ ;– коэффициент, учитывающий материал инструмента.

$K_{mv} = 1,2$ ;– коэффициент, учитывающий влияние материала заготовки.

$$K_v = 1,2 \cdot 1 \cdot 0,3 = 0,38;$$

Найдем величину скорости резания  $U$ :

$$U = \frac{14,7 \cdot 10^{0,25}}{60^{0,125} \cdot 0,66^{0,55}} \cdot 0,38 = 7,48 \text{ м/мин};$$

Частоту вращения  $n$  рассчитаем по формуле :

$$n = \frac{1000 \cdot U}{\pi \cdot D} \text{ об/мин};$$

где:

$D$  – диаметр сверла, мм;

$U$ – скорость резания, м/мин.

$$n = \frac{1000 \cdot 7,48}{3,14 \cdot 10} = 238 \text{ об/мин};$$

Выбираем число оборотов  $n=260$  об/мин

После чего уточняем скорость резания по формуле:

$$U = \frac{n \cdot \pi \cdot D}{1000} \text{ м/мин};$$



где:

$D$  – диаметр сверла, мм;

$n$  – число оборотов, об/мин.

Подставляя значения в формулу находим что, скорость  $U$  равна:

$$U = \frac{260 \cdot 3,14 \cdot 10}{1000} = 8,2 \text{ м/мин};$$

Принимаем скорость резания  $U$  равной:  $U = 8,2 \text{ м/мин}$ ;

Крутящий момент и осевую силу рассчитываем по формулам:

$$M_{кр} = 10 \cdot C_M \cdot D^q \cdot s^y \cdot K_p;$$

$$P_0 = 10 \cdot C_p \cdot D^q \cdot s^y \cdot K_p;$$

где:  $C_M, C_p \cdot q, y$  коэффициент и показатели степени для конкретных условий обработки а именно: обрабатываемый материал серый чугун НВ190, материал режущей части инструмента Р6М5. По рекомендациям в [8] выбираем следующие коэффициенты:

- для расчета крутящего момента  $C_M = 0,021; q = 2; y = 0,8; K_p = 1,11$ ;

- для расчета осевой силы  $C_p = 43,3; q = 1; y = 0,8; K_p = 1,11$ ;

$$M_{кр} = 10 \cdot 0,021 \cdot 10^2 \cdot 0,66^{0,8} \cdot 1,11 = 16,7 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

$$P_0 = 10 \cdot 43,3 \cdot 10^2 \cdot 0,66^{0,8} \cdot 1,11 = 34470 \text{ Н}$$

Мощность резания найдём по формуле:

$$N_e = \frac{n \cdot M_{кр} \cdot l}{9750} / \text{мин};$$

$$N_e = \frac{260 \cdot 16,7}{9750} = 0,45 \text{ кВт};$$

Машинное время  $T_{маш}$  найдём по формуле:

$$T_{маш} = \frac{L \cdot i}{n \cdot S};$$

где  $L$  – длина рабочего хода, равная в нашем случае:  $L = 47$  мм.

$$T_{маш} = \frac{47 \cdot 1}{260 \cdot 0,66} = 0,27 \text{ мин};$$

Штучное время  $T_{шт}$  найдём по формуле:

$$T_{шт} = T_M + T_B + T_{П-З};$$

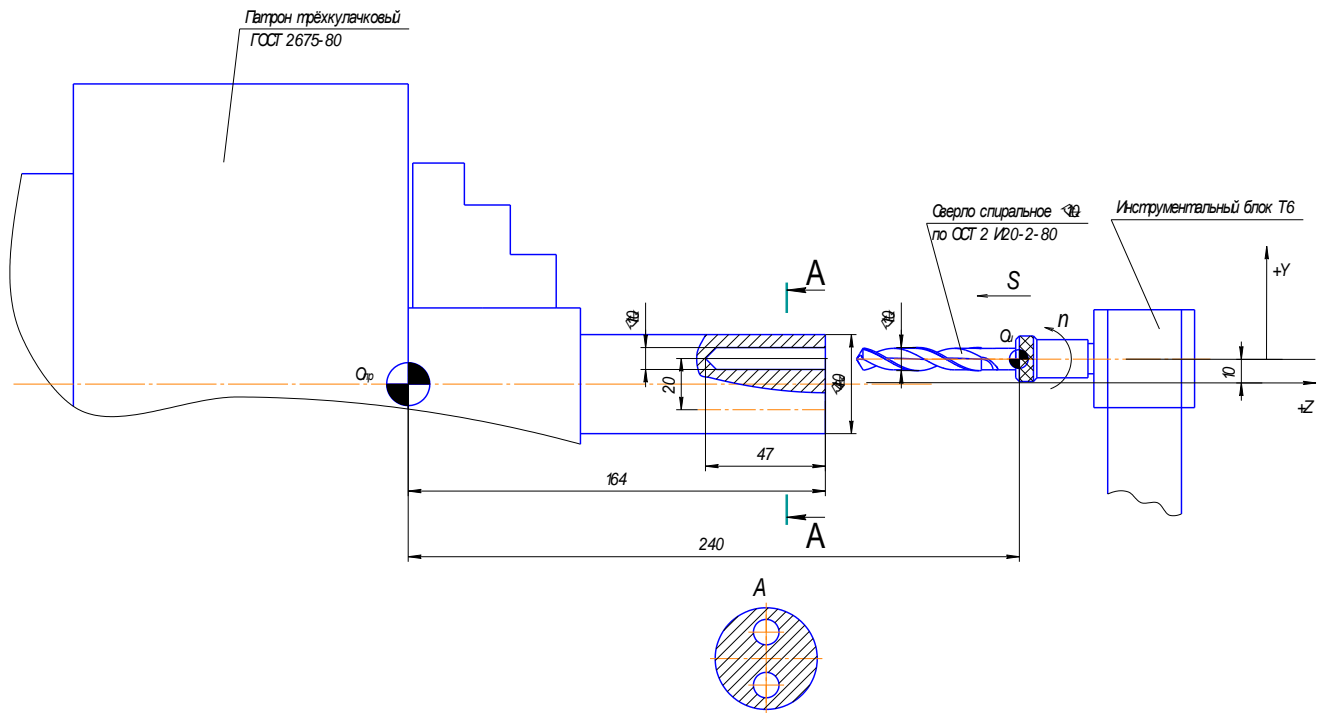
где  $T_B = 0,439$  – вспомогательное время;

$T_{П-З} = 0,153$  – подготовительно – заготовительное время;

$T_M$  – машинное время.

Подставив исходные данные в формулу получим:

$$T_{шт} = 0,27 + 0,439 + 0,153 = 0,862 \text{ мин};$$



Циклограмма

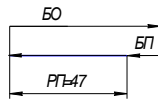


Рисунок 4.3 - Схема наладки сверление отверстия

#### 4.1.3 Нарезание резьбы

Для нарезания сверления отверстия и нарезания в нём резьбы выберем специальный инструмент сверло-метчик из быстрорежущей стали Р6М5 с цилиндрическим хвостовиком короткой серии с размерами:

$d=6$  мм – диаметр сверла,

$L=100$  мм – длина сверла,

$l=55$  мм – длина рабочей части сверла.

Глубина резания:  $t = 47$  мм.

По таблице 25 в [1] для обработки отверстия в СЧ12 выбираем подачу

$S = 0,66$  мм/об.

Скорость резания  $U$  рассчитывается по формуле

$$V = \frac{C_v D^q}{T^m \cdot S^y} \cdot K_v \text{ м/мин};$$

где:  $C_v, x, m, y$ :— коэффициент и показатели степени для конкретных условий обработки а именно: обрабатываемый материал серый чугун НВ190, материал режущей части инструмента Р6М5. По рекомендациям в [1] выбираем следующие коэффициенты:  $C_v = 14,7, q = 0,25, m = 0,125, y = 0,55$ ;

$T$  – период стойкости инструмента, в данном случае 45 минут.

Поправочный коэффициент  $K_v$  – представляет собой произведение ряда коэффициентов учитывающих фактическое усилие резания, и рассчитывается по формуле:

$$K_v = K_{mv} \cdot K_{nv} \cdot K_{uv};$$

где:  $K_{nv} = 1$ ;— коэффициент, учитывающий состояние поверхности.

$K_{uv} = 0,3$ ;— коэффициент, учитывающий материал инструмента.

$K_{mv} = 1,2$ ;— коэффициент, учитывающий влияние материала заготовки.

$$K_v = 1,2 \cdot 1 \cdot 0,3 = 0,38;$$

Найдем величину скорости резания  $V$ :

$$V = \frac{14,7 \cdot 6^{0,25}}{60^{0,125} \cdot 0,66^{0,55}} \cdot 0,38 = 6,59 \text{ м/мин};$$

Частоту вращения  $n$  рассчитаем по формуле :

$$n = \frac{1000 \cdot U}{\pi \cdot D} \text{ об/мин};$$

где:

D – диаметр сверла, мм;

U – скорость резания, м/мин.

$$n = \frac{1000 \cdot 6,59}{3,14 \cdot 6} = 350 \text{ об/мин};$$

Выбираем число оборотов  $n=360$  об/мин

После чего уточняем скорость резания по формуле:

$$U = \frac{n \cdot \pi \cdot D}{1000} \text{ м/мин};$$

где:

D – диаметр сверла, мм;

n – число оборотов, об/мин.

Подставляя значения в формулу находим что, скорость U равна:

$$U = \frac{360 \cdot 3,14 \cdot 6}{1000} = 6,79 \text{ м/мин};$$

Принимаем скорость резания U равной:  $U = 6,8 \text{ м/мин};$

Крутящий момент и осевую силу рассчитываем по формулам:

$$M_{кр} = 10 \cdot C_M \cdot D^q \cdot s^y \cdot K_p;$$

$$P_0 = 10 \cdot C_p \cdot D^q \cdot s^y \cdot K_p;$$

где:  $C_M, C_p \cdot q, y$  коэффициент и показатели степени для конкретных условий обработки а именно: обрабатываемый материал серый чугун HB190, материал режущей части инструмента P6M5. По рекомендациям в [1] выбираем следующие коэффициенты:

- для расчета крутящего момента  $C_M = 0,021; q = 2; y = 0,8; K_p = 1,11;$

- для расчета осевой силы  $C_p = 43,3; q = 1; y = 0,8; K_p = 1,11;$

$$M_{кр} = 10 \cdot 0,021 \cdot 6^2 \cdot 0,66^{0,8} \cdot 1,11 = 6 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

$$P_0 = 10 \cdot 43,3 \cdot 6^2 \cdot 0,66^{0,8} \cdot 1,11 = 12409 \text{ Н}$$

Мощность резания найдём по формуле:

$$N_e = \frac{n \cdot M_{кр}}{9750} \text{ м/мин};$$

$$N_e = \frac{360 \cdot 6}{9750} = 0,22 \text{ кВт};$$

Машинное время  $T_{маш}$  найдём по формуле:

$$T_{маш} = \frac{L \cdot i}{n \cdot S};$$

где  $L$  – длина рабочего хода, равная в нашем случае:  $L = 47 \text{ мм}$ .

$$T_{МАШ} = \frac{47 \cdot 1}{360 \cdot 0,66} = 0,20 \text{ мин};$$

Штучное время Тшт найдём по формуле:

$$T_{шт} = T_M + T_B + T_{П-З};$$

где  $T_B = 0,439$  – вспомогательное время;

$T_{П-З} = 0,153$  – подготовительно – заготовительное время;

$T_M$  – машинное время.

Подставив исходные данные в формулу получим:

$$T_{шт} = 0,20 + 0,439 + 0,153 = 0,792 \text{ мин};$$

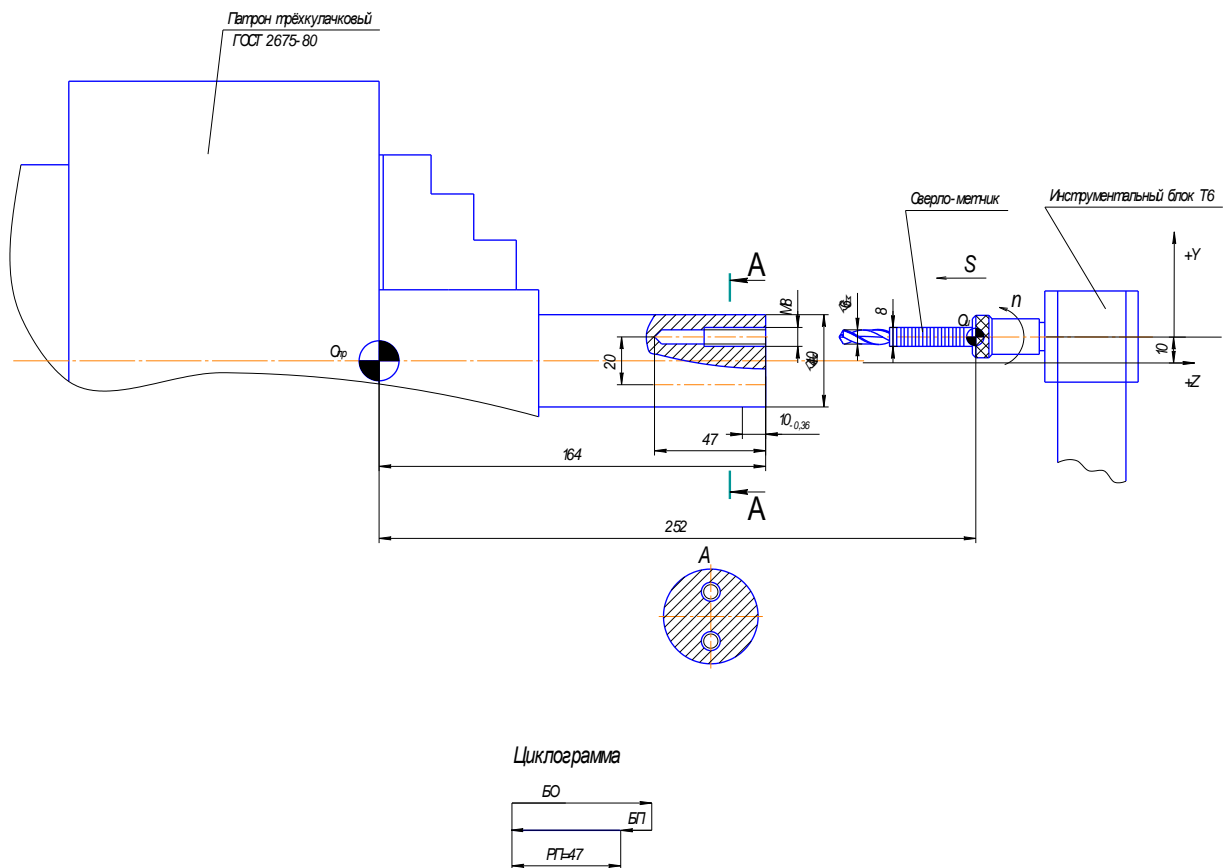


Рисунок 4.4 - Схема наладки нарезания резьбы

## Глава 5 Разработка циклограммы

В обработке продольного шпоночного паза задействованы 6 узлов: зажимное приспособление, узел вращения шпинделя, узел продольной подачи, узел поперечной подачи, узел вращения инструмента и узел поворота револьверной головки. Обработка происходит следующим образом.

Заготовку устанавливают в патроне, патрон зажимается. Включается и узел поворота револьверной головки, головка принимает положение Т6 (положение инструментального блока), после чего включается привод вращения инструмента и инструмент посредством поперечной подачи подводится к заготовке. Затем происходит врезание инструмента в заготовку продольной подачей. Затем поперечной подачей совершается фрезерование паза. Потом происходит углубление инструмента продольной подачей. Затем вновь фрезерование паза за счёт поперечной подачи. Потом вновь углубление инструмента в заготовку продольной подачей. После чего вновь фрезерование паза поперечной подачей. Затем происходит отвод инструмента продольной подачей и отвод на начальное положение поперечной подачей. После перестаёт вращаться привод инструментального блока. После чего сигнал подаётся на револьверную головку. Планшайба меняет позицию на исходную Т5. Патрон разжимается и заготовка снимается с патрона. Циклограмма в графическом виде показана на рисунке 5.1.



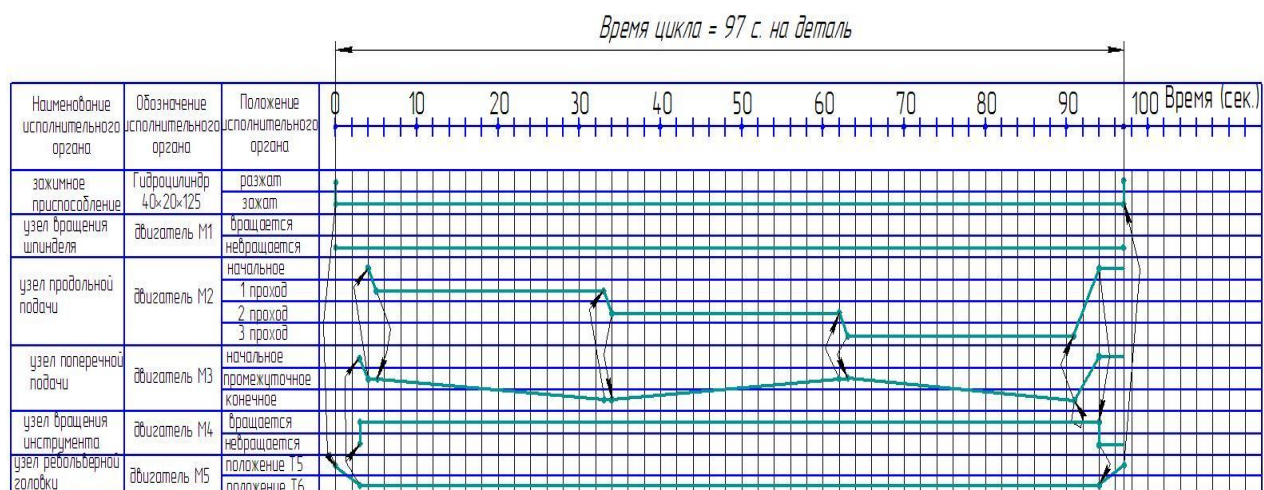


Рисунок 5.1 - Циклограмма фрезерования шпоночного паза

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Достигнута цель магистерской диссертации по расширению технологических возможностей станка путём совершенствования его технологического оснащения.

Решены следующие задачи:

- Рассчитан и спроектирован привод инструментального блока. Привод должен иметь компактные размеры, а также его конструкция должна обеспечивать быстрое закрепление хвостовика и передачу крутящего момента.

- Рассчитан и спроектирован узел вращения осевого инструмента. Оправка должна иметь компактные размеры и при этом выдерживать требуемые нагрузки.

- Разработаны технические решения, обеспечивающие расширение технологических возможностей станка, а именно фрезерование шпоночных пазов, сверление и нарезание резьб в отверстиях несоосных оси станка.

- Разработан дополнительный сменный модуль ультразвуковой обработки

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Rejto, A. Einige Prinzipien der theoretischen mechanischen Tchnolgie der metalle [Текст] / A. Rejto. – 1927. – 167 с.
- 2 Piispanen, V.: Lastunmoudostumisen Teoriaa [Текст]. Teknillinen Aikakauslehti 27 (1937) N.9, S. 315 bis 322.
- 3 Merchant, M.E. Mechanics of the Metal Cutting Process [Текст] / M.E. Merchant // Journal of applied Physics. – Vol.16, N 5. – 1945. – S. 267 – 324.
- 4 Lee, E.H. The Theory of Plasticity Applied to a Problem of Maching [Текст] / E.N. Lee, B.W. Shaffer // Journal of Applied Mechanics 73 (1951) N.12, S. 405 - 413
- 5 Зорев, Н.Н. Вопросы механики процесса резания металлов [Текст] / Н.Н. Зорев. – М.: Машгиз. 1956. – 252 с.
- 6 Зорев, Н.Н. Исследование элементов механики процесса резания [Текст]. – М.: Машгиз, 1956 – 365 с.
- 7 Армарего, И.Д. Обработка материалов резанием [Текст]/ И.Д. Армарего, Р.Х. Брауню. – М.: Машиностроение, 1977. – 325 с.
- 8 Малышев, В.И. Из истории развития науки и техники о резании материалов [Текст]/ В.И.Малышев. – Тольятти: ТГУ, 2008. – 71 с.
- 9 Гордеев, А.В. К анализу сил в зоне резания [Текст]/ А.В.Гордеев, Н.А.Костин // Теплофизические и технологические аспекты управления качеством в машиностроении. – Тольятти: ТГУ, 2005. – С. 226-229.
- 10 Васин, С.А. Резание материалов: Термомеханический подход к системе взаимосвязей при резании [Текст]/ С.А. Васин, А.С. Верещака, В.С. Кушнер. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. – 448 с.
- 11 Альтшуллер, Г.С. Творчество как точная наука [Текст] / Г.А. Альтшуллер. – М.: Советское радио, 1979. – 176 с.
- 12 Альтшуллер, Г.С. Алгоритм изобретения [Текст] / Г.С. Альтшуллер. - М.: Московский рабочий, 1973.-296 с.
- 13 Гордеев, А.В. Основы технического творчества: учебное пособие [Текст]/ А.В. Гордеев – Тольятти: ТГУ, 2008. - 216 с.

14 Гордеев, А.В. Решение задач технологии машиностроения эвристическими методами [Текст]/ А.В. Гордеев // Теплофизические и технологические аспекты управления качеством в машиностроении – Тольятти: ТГУ, 2008 – с. 68-78.

15 Гошкодеря, Л.В. Метод разделения противоречий – путь решения задач технологии машиностроения [Текст]/ Л.В. Гошкодеря // Дни науки в ТГУ. – Тольятти: ТГУ, 2008 – с. 39-40.

16 Гордеев, А.В. Использование физических эффектов и явлений при решении задач технического творчества [Текст]/ А.В.Гордеев. – Тольятти: ТПИ, 1995. – 26 с.

17 Физические эффекты в машиностроении: Справочник [Текст]/ В.А.Лукьянец, З.И.Аллязова, Н.П. Бурмистрова и др. – М.: Машиностроение, 1993.- 224 с.

18 Троицкий, О.А. Физические основы и технология обработки современных материалов [Текст] / О.А. Троицкий, Ю.В. Баранов, Ю.С. Аврамов, А.Д. Шаляпин. В 2-х томах. Т. 1.- М. – Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2004. – 590 с.

19 Вологин, М.Ф. Применение ультразвука и взрыва при обработке и сборке [Текст]/ М.Ф.Вологин, В.В. Калашников, М.С. Нерубай, Б.Л. Штриков. – М.: Машиностроение, 2002 – 264 с.

20 Насад, Т.Г. Высокоскоростная лезвийная обработка труднообрабатываемых материалов с дополнительными потоками энергии в зоне резания [Текст]:/ Т.Г. Насад, Дис. д-ра техн. наук: 05.03.01, Саратов: РГБ, -2006 – 404 с.

21 Насад, Т.Г. Системный подход к исследованию процесса лезвийной обработки сталей с фрикционным подогревом зоны резания [Текст]/Т.Г.Насад //Современные технологии в машиностроении.- Пенза, Пензенский госуниверситет, 2001- С.79.

22 Насад, Т.Г. Оптимизация параметров процесса высокоскоростной обработки с тепловым воздействием [Текст]. Т.Г.Насад // Автоматизация и управление в машиностроении.- Саратов СГТУ, 2004-С.97-100.

23 Кирюшин, Д.Е. Обработка резанием титановых сплавов [Текст]/ Д.Е. Кирюшин, Т.Г. Насад // Автоматизация и управление в машино- и приборостроении. - Саратов СГТУ, 2005 - С. 105-108.

24 Насад, Т.Г. Оптимизация процесса высокоскоростной обработки коррозионных сталей [Текст]/ Т.Г.Насад // Прогрессивные направления технологии машиностроения. – Саратов: СГТУ, 2004. – С. 143-147.

25 Попилов, Л.Я. Электрофизическая и электрохимическая обработка материалов [Текст]/ Л.Я.Попилов Справочник. – М.: Машиностроение, 1982 - 397 с.

26 Хейфец, М.Л. Проектирование процессов комбинированной обработки [Текст] / М.Л.Хейфец - М.: Машиностроение. 2005. – 272 с.

27 Хейфец М.Л. Повышение эффективности процессов формирования поверхностей с позиций синергетического подхода [Текст] / М.Л.Хейфец // Известия вузов. Машиностроение. – 1992. – №7-9. – С. 121 - 125.

28 Синергетические аспекты физико-химических методов обработки [Текст] /А.И. Гордиенко,М.Л. Хейфец, Б.П. Чемисов и др. – Минск: ФТИ; Полоцк: ПТУ, 2000. - 172 с.

29 Хейфец, М.Л. Пути повышения эффективности процессов формирования поверхностей с позицией синергетики [Текст]/ М.Л. Хейфец. //Вестник машиностроения. – 1994. – №2. – С. 22-25.

30 Коновалов, Е.Г. Прогрессивные схемы ротационного резания металлов [Текст] /Е.Г.Коновалов, Сидоренко Е.Г., Соусь В.А.- Минск: Наука и техника, 1972- 272 с.

31 Тофпенец, Р.Л. Физические основы термоциклической обработки стареющих сплавов [Текст]/ Р.Л.Тофпенец, И.И., Шиманский, А.Г Анисович, А.Д. Грешилов. – Наука и техника, 1992. - 190 с.

32 Кидин, И.Н. Физические основы электротермической обработки металлов и сплавов [Текст] / И.Н.Кидин – М.: Металлургия, 1969. - 375 с.

33 Плазменные процессы в металлургии и технологии неорганических материалов [Текст]. Сборник под ред. Б.Е. Патона. – М.: Наука, 1973- 244 с.

34 Approximating curves and their offsets using biarcs and Pythagorean hodograph quintics [Текст] / Z. Sir, R. Feichtinger, B. Juttler // Computer-Aided Design. – 2006. – 38(6). – p. 608–618.

35 Sir, Z. Constructing acceleration continuous tool paths using Pythagorean hodograph curves [Текст]/ Z. Sir, B. Juttler // Mechanism and Machine Theory. – 2005. – 40(11). – p. 1258–1272.

36 Warkentin, A. Intersection approach to multi-point machining of sculptured surfaces [Текст]/ A. Warkentin, F. Ismail, S. Bedi // Computer Aided Geometric Design. – 1998. – 15(6). – p. 567–584.

37 Fuchs, F.J. Ultrasonic Cleaning, Metal Finishing Guidebook and Directory [Текст] / F.J. Fuchs // Elsevier Science. – 1992. – p. 134-139

38 Wick, C. Ultrasonic Cleaning, Tool and Manufacturing Engineers Handbook [Текст] / C. Wick and R.F. Ed. Veilleux // Materials, Finishing, and Coating, Society of Manufacturing Engineers. – 1985. – Vol. 3. – p. 18-20 to 18-24