

Министерство образования Республики Беларусь

УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ
«ПОЛОЦКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
(Полоцкий государственный университет)

УДК 621.91.01/02
№ госрегистрации 20200182

УТВЕРЖДАЮ
Проректор по научной работе
Полоцкого государственного
университета,
канд.пед.наук

_____ И.В. Бурая
«__» _____ 2021 г.

ОТЧЕТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

НАУЧНЫЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ СОЗДАНИЯ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ
И ВЫСОКОТОЧНЫХ ПРОЦЕССОВ, СТАНКОВ И ИНСТРУМЕНТОВ ДЛЯ
ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ С ЗАДАННЫМИ СВОЙСТВАМИ
(заключительный)

Начальник
отдела сопровождения
научных исследований

«__» _____ 2021г.

Т.В. Гончарова

Руководитель НИР,
д-р.техн.наук, профессор

«__» _____ 2021г.

Н.Н. Попок

Новополоцк 2021

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель НИР,
Заведующий кафедрой
технологии и оборудования
машиностроительного
производства,
д-р техн. наук, профессор

_____ 2021г.
«__»_____

Н.Н. Попок
(введение, разделы 1,
заключение)

Исполнители:

канд.техн.наук, доцент

_____ 2021г.
«__»_____

Хмельницкий Р.С.
(раздел 1)

канд.техн.наук, профессор

_____ 2021г.
«__»_____

Голембиевский А.И.
(раздел 2)

канд.техн.наук, доцент

_____ 2021г.
«__»_____

Киселев Р.А.
(раздел 3)

канд.техн.наук, доцент

_____ 2021г.
«__»_____

Дронченко В.А.
(раздел 5)

старший преподаватель

_____ 2021г.
«__»_____

Портянко С.А.
(раздел 1.2,1.3,1.8)

старший преподаватель

_____ 2021г.
«__»_____

Тихон Е.М.
(раздел 1.3,1.6)

старший преподаватель

_____ 2021г.
«__»_____

Гвоздь Г.И.
(раздел 1.5)

старший преподаватель

_____ 2021г.
«__»_____

Бритик Е.В.
(раздел 1.7)

ассистент

_____ 2021г.
«__»_____

Анисимов В.С.
(раздел 1.3,1.4)

мастер производственного
обучения

_____ 2021г.
«__»_____

Яловский О.В.
(раздел 4)

Нормоконтролер

_____ 2021г.
«__»_____

Л.В. Ищенко

Реферат

Отчет: 201 с., 89 рис., 25 табл., 143 источника.

Ключевые слова: методология, процесс резания, модель, 3D прототипирование, блочно-модульный режущий инструмент, степень сложности, станок, кинематическая структура, зубчатый контур, утилизация отходов.

Объектом исследования являются металлорежущие станки и режущие инструменты для высокоскоростной и высокоточной обработки поверхностей деталей.

Цель работы – разработать научные и технологические основы создания высокоскоростных и высокоточных процессов, станков и инструментов для обработки материалов с заданными свойствами.

Метод исследования: аналитический.

В результате исследований разработаны методология и методика исследования процесса резания материалов в современных условиях развития машиностроения, предложены модели режущих инструментов, в том числе с использованием 3D прототипирования, исследованы точность и степень сложности обработки различных поверхностей деталей, разработаны основные этапы подготовки производства блочно-модульных режущих инструментов на основе 3D печати моделей из пластиковых материалов, разработана научная парадигма функционального проектирования кинематической структуры металлорежущих станков с электронными связями в формообразующих группах, обоснована структура станочного оборудования для обработки изделий с зубчатым контуром, определены кинематические и геометрические параметры при проектировании резцовых головок для обработки с параллельными осями инструмента и заготовки, предложены способы переработки и утилизации отходом машиностроительных предприятий.

Степень внедрения – результаты исследований используются в образовательном процессе Полоцкого государственного университета при проведении лекционных, лабораторных и практических занятий, а также при курсовом и дипломном проектировании по специальностям «Технология машиностроения» и «Производство изделий на основе трехмерных технологий» и в производстве научно-технологического оборудования.

Экономическая эффективность достигается за счет повышения производительности обработки заготовок и стойкости режущих инструментов от 2 до 3 раз по сравнению со стандартными.

Содержание

ВВЕДЕНИЕ.....	6
1 МЕТОДОЛОГИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ МАТЕРИАЛОВ, СТАНКОВ И ИНСТРУМЕНТОВ	8
1.1 Кинематико-геометрические, физические и технологические основы процесса резания	8
1.2 Методология исследования работоспособности фрезерных и осевых режущих инструментов на основе 3D прототипирования.....	22
1.3 Моделирование и регулирование стружкообразования и потоков смазочно-охлаждающей технологической среды при фрезеровании.....	38
1.4 Механическая обработка плоских и криволинейных поверхностей деталей вращающимся режущим инструментом на токарных и фрезерных станках с ЧПУ	48
1.5 Модель и алгоритм проектирования блочно-модульных режущих инструментов	67
1.6 Повышение точности блочно-модульных расточных режущих инструментов.....	76
1.7 Исследование степени сложности машиностроительных изделий	84
1.8 Подготовка производства блочно-модульных фрез с использованием 3D прототипирования.....	98
2 ФУНКЦИОНАЛЬНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ КИНЕМАТИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ МЕТАЛЛОРЕЖУЩИХ СТАНКОВ С ЭЛЕКТРОННЫМИ СВЯЗЯМИ В ФОРМООБРАЗУЮЩИХ ГРУППАХ.....	110
2.1 Постановка задачи.....	110
2.2 Синтез гибридной кинематической структуры станка по схеме задающая – ведомая координаты	111
2.3 Синтез гибридной кинематической структуры станка по схеме равнозначных координат ..	116
2.4 Электронная система синхронизации исполнительных органов станка для обработки двухшаговых червяков чашечным резцом.....	124
3 ОБОСНОВАНИЕ СТРУКТУРЫ СТАНОЧНОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ИЗДЕЛИЙ С ЗУБЧАТЫМ КОНТУРОМ	134
3.1 Кинематическая структура станочного оборудования	134
3.2 Параметрическая оптимизация компонентов формообразующей системы станочного оборудования для обработки изделий с зубчатым контуром	139
3.3 Разработка компоновки и механики автоматизированного станочного оборудования для обработки изделий с зубчатым контуром.....	144
3.4 Режимы обработки	148
4 ОПРЕДЕЛЕНИЕ УГЛОВ СКОРОСТИ РЕЗАНИЯ И ПОДАЧИ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ РЕЗЦОВЫХ ГОЛОВОК ДЛЯ СПОСОБА ОБРАБОТКИ С ПАРАЛЛЕЛЬНЫМИ ОСЯМИ ИНСТРУМЕНТА И ЗАГОТОВКИ	151
4.1 Постановка задачи.....	151
4.2 Угол скорости резания и угол подачи при дискретном задании подачи резания.....	153
4.3 При непрерывном задании подачи резания.....	155
4.4 Определение угла скорости резания η' при непрерывной подаче врезания.....	157
4.5 Определение угла подачи μ' при непрерывном движении подачи врезания	158

4.6 Угол подачи при профилировании путем дискретного изменения параметра L	159
4.7 Угол подачи при профилировании путем непрерывного изменения параметра L	159
4.8 Угол подачи при дискретном задании движения подачи врезания и наличия движения кругового профилирования	161
5 СПОСОБЫ ПЕРЕРАБОТКИ И УТИЛИЗАЦИИ НЕФТЕСОДЕРЖАЩИХ ОТХОДОВ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ	163
5.1 Постановка задачи.....	163
5.2 Влияние нефтесодержащих отходов машиностроительного предприятия на здоровье работающих и окружающую среду	165
5.3 Анализ источников нефтесодержащих отходов и нормативных документов в сфере обращения с отходами производства	169
5.4 Регенерация загрязненных нефтесодержащих продуктов как способ снижения объемов нефтесодержащих отходов, подлежащих утилизации	174
5.5 Направления использования, совершенствования переработки и утилизации нефтесодержащих отходов предприятий.....	176
5.6 Выбросы котельных установок и способы их снижения	180
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	184
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	190

ВВЕДЕНИЕ

Развитие науки о резании материалов определяется, с одной стороны, современными достижениями в области исследований физико-химических явлений, а с другой – происходящими техническими переменами в машиностроительном производстве. Исследования процесса резания по своей структуре, логической организации применяемых методов и средств должны учитывать происходящие изменения в фундаментальной науке и производственной деятельности.

В настоящее время эти достижения и изменения обобщены в концепциях технологических укладов (уклады I–VI) или промышленных революций («индустрия 1,0» – «индустрия 4,0») и развития образования («университет 1,0» – «университет 4,0») [1–5]. Технологический уклад – это совокупность сопряженных производств, имеющих одинаковый технический уровень и развивающихся синхронно.

В 2010 году в развитых странах доля производительных сил четвертого технологического уклада (период интенсивного развития 1930–1970 гг.) составляла 20%, пятого (1970–2010 гг.) – 60% и прогнозного шестого (2010–2050 гг.) – 5%.

Примерно с 2002 года разрабатывается теория конвергенции – сближения, слияния каких-либо параметров и элементов в независимых друг от друга явлениях, которая предполагает объединение и синергетическое усиление наноуровневых, биологических, информационных и когнитивных (НБИК) технологий [6]. Результатом НБИК конвергенции будет полное слияние этих технологий в единую научно-технологическую область знания. Предполагается переход к природоподобным технологиям. При этом необходимо учитывать реализуемую в настоящее время концепцию устойчивого или гармоничного развития, предусматривающую баланс цивилизации и природы, в том числе инноваций, и восприимчивость к ним производства [7]. В связи с этим развивается теория мобильного производства, позволяющая обосновывать быстрый и с минимальными финансовыми затратами технологический переход предприятия к выпуску инновационной продукции [8]. Мобильные производства основываются на разработке технологических модулей – переходов операций технического процесса, учитывающих материалы, конструктивные элементы и поверхности детали, вид обработки резанием и его режимы, технологическое оборудование и оснастку. Для реализации технологических модулей и мобильного развития производства на их основе необходимо, чтобы оборудование и оснастка были многофункциональными [9]. Многофункциональность обеспечивается за счет применения металлорежущих станков с числовым программным управлением (ЧПУ), реализующих трех-, четырех- и пятиосевую обработку резанием, и

быстроперестраиваемой технологической оснасткой модульного типа. В основу принципиальных конструктивных схем многофункционального модульного оборудования и оснастки положены кинематические схемы резания, предложенные профессором Г.И. Грановским [11–13], которые в настоящее время интенсивно реализуются и развиваются.

Следует также отметить, что главные этапы развития науки о резании материалов соответствуют этим концепциям и определяются требованиями механизации и автоматизации технологических процессов, масштабами производства, изменением источников энергии, применением наноматериалов, микроэлектроники, нейронных сетей, искусственного интеллекта, информатизацией производства на основе интернет-технологий.

1 МЕТОДОЛОГИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ МАТЕРИАЛОВ, СТАНКОВ И ИНСТРУМЕНТОВ

1.1 Кинематико-геометрические, физические и технологические основы процесса резания

Анализ кинематических схем резания показывает, что их многообразие (порядка 700 схем) можно свести к некоторой обобщенной (единой) кинематической схеме резания, представленной на рисунке 1.1.1. Кинематическая схема резания условно изображается в прямоугольной системе координат, оси которой имеют определенную направленность: ось OZ – вдоль вектора линейной скорости \vec{v}_e движения резания, ось OX – вдоль оси вращательного движения резания, ось OY – по радиусу к вращательному движению. Движение резания – результирующее движение режущего инструмента и заготовки в процессе резания. Обрабатываемая заготовка $З$ и режущий инструмент $РИ$, представленные в виде окружных сечений их разнообразных форм, могут совершать поступательные и вращательные элементарные движения резания $D_1 \div D_6$ вдоль и вокруг осей OX , OY и OZ , т.е. иметь, согласно базовым положениям теоретической механики, шесть степеней свободы (кинематические признаки).

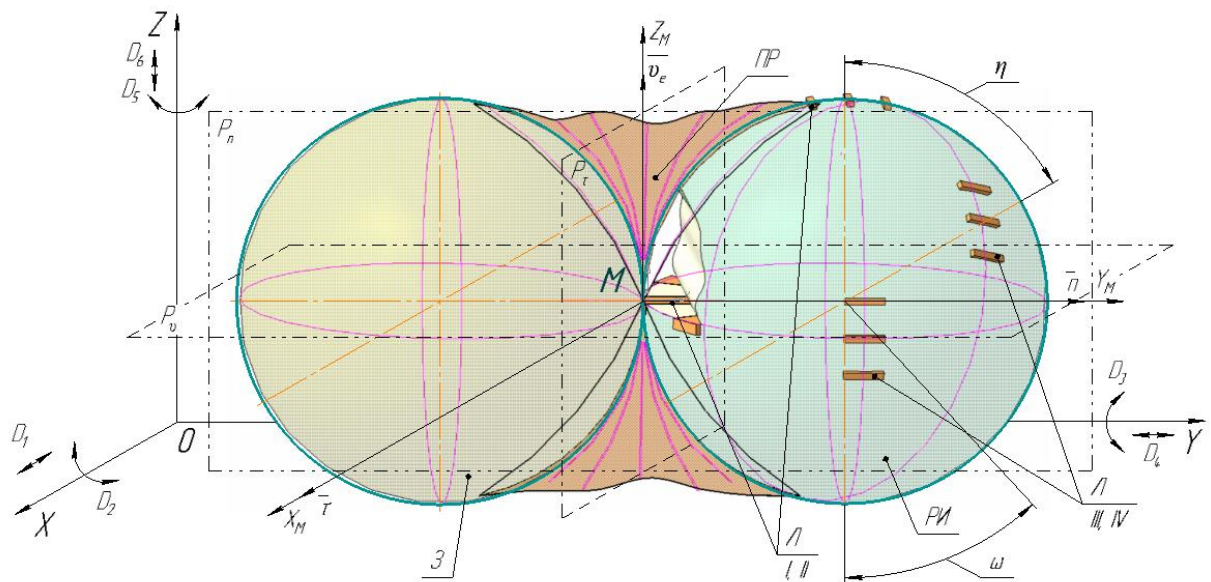


Рисунок 1.1.1 – Обобщенная кинематическая схема резания

Лезвия $Л$ инструмента $РИ$ могут находиться на периферии (положения I и II) и торце (положения III и IV) окружных сечений внешней и внутренней поверхностей воображаемой сферы (конструктивные признаки). В точке M лезвия $Л$ в координатной

системе x_m, y_m, z_m проведены касательный $\bar{\tau}$, нормальный \bar{n} и бинормальный (в данном случае \bar{v}_e) векторы (репер Френе), которые определяют положение отсчетных для геометрических параметров лезвия плоскостей: основной $P_v - P_v$, главной секущей $P_r - P_r$ и касательной $P_n - P_n$. Оси вращения окружных сечений заготовки и инструмента расположены под углами ω и η относительно друг друга в двух диаметрально противоположных плоскостях (установочные признаки). Сочетание элементарных движений $D_1 \div D_6$ и положений заготовки, инструмента и лезвий в процессе резания обеспечивают формирование поверхности резания по выпуклой, вогнутой и плоской форм.

Обобщенную кинематическую схему резания можно привести к схеме той или иной разновидности обработки резанием путем введения дополнительных условий:

- 1) принятие любого из элементарных движений резания, направление линейной скорости которого параллельно оси OZ, главным движением резания. Главное движение резания – это элементарное движение резания, осуществляемое с наибольшей скоростью;
- 2) исключение из обобщенной кинематической схемы резания тех движений, которые не реализуются в данной разновидности резания;
- 3) изменение расположения оси не главного вращательного движения (окружности) путем ее поворота относительно точки M установки оси этого движения в положение, параллельное той координатной оси, относительно которой задан угол взаимной установки инструмента и заготовки;
- 4) корректировка направлений элементарных движений резания с учетом конкретной разновидности резания;
- 5) установление соотношений линейных скоростей элементарных движений резания.

Например, для четырехэлементной кинематической схемы резания (рис. 1.1.2) примем вращательное движение заготовки D_1 и его линейную скорость v_1 главным движением резания D_r и v_r соответственно, вращательное движение инструмента D_2 и его линейную скорость v_2 – касательным движением резания D_k и v_k соответственно, поступательные движения инструмента D_3 и D_4 и их линейные скорости v_3 и v_4 – движениями подачи D_{s1} и D_{s2} , и скоростями подачи v_{s1} и v_{s2} соответственно. Тогда результирующая линейная скорость движения резания будет равна:

$$v_e = v_1 + v_2 + v_3 + v_4 = v_r + v_k + v_{s1} + v_{s2} = v_r \left(1 + \frac{v_k}{v_r} + \frac{v_{s1}}{v_r} + \frac{v_{s2}}{v_r} \right) = v_r \cdot (1 + i_k + i_{s1} + i_{s2}).$$

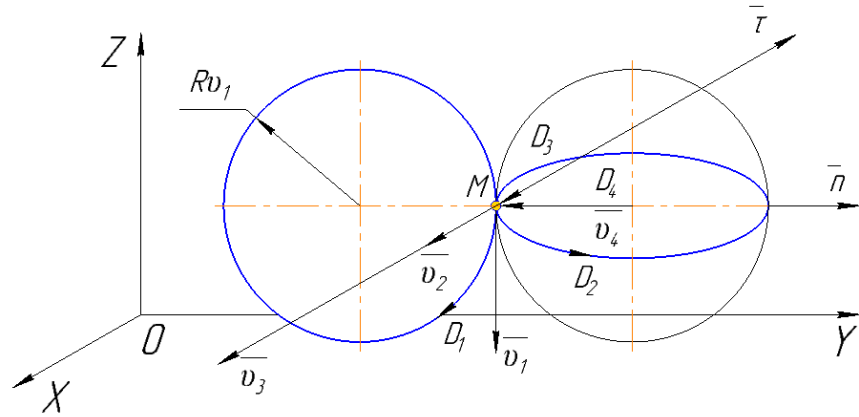


Рисунок 1.1.2. – Четырехэлементная кинематическая схема

Трансформация четырехэлементной кинематической схемы в более простые, описывающие традиционные виды обработки резанием, проводится при определенных передаточных отношениях i_k, i_{s1}, i_{s2} величинах и направлениях линейных скоростей v_r, v_k, v_{s1}, v_{s2} элементарных движений резания. Например, при $i_k = i_{s1} = i_{s2} = 0$ и $v_r \neq 0$ имеют место строгание, долбление, протягивание; при $v_r \gg v_s$ и $i_k = i_s = 0, R_{v_r} = i_k v$ – точение; при $v_r > v_k > v_s$ и $i_{s2} = 0$ – ротационное точение или фрезеточение; при $v_r > v_s$ и $i_k = i_{s2} = 0, v_{s1} \parallel$ оси $v_r, R_{v_r} = const$ – осевая обработка; при $v_r > v_{s1}$ и $i_k = i_{s2} = 0, v_s \perp$ оси $v_r, R_{v_r} = const$ – фрезерование; при $v_r > v_{s1}, v_k \neq 0, v_{s2} = 0$ – зубофрезерование и т.д., где R_{v_r} – радиус траектории главного движения резания.

Реализация двух-, трех- и четырехэлементных кинематических схем резания на современных станках с ЧПУ, приводит к таким видам обработки, как винтовая интерполяция, трепанация, трохоидальное и плунжерное резание и другим. Как правило, в этих видах обработки используется касательное движение или врезание по касательной режущих лезвий. Согласно [12] касательное движение – это прямолинейное поступательное или вращательное движение режущего инструмента, скорость которого меньше скорости главного движения резания и направлена по касательной к режущей кромке, предназначенное для того, чтобы сменить контактирующие с заготовкой участки режущей кромки. Профессор В.Ф. Бобров [15] трактует это понятие несколько шире и рассматривает точение резцом, режущая кромка которого касательна к обработанной поверхности или перемещается вдоль самой себя. Доказано [16, 17], что касательное движение режущей кромки снижает силы трения, температуру и мощность резания. Принято принципиальное положение теории резания [18, 19], согласно которому каждой

паре обрабатываемого и инструментального материалов соответствует оптимальная скорость резания, обеспечивающая минимальное значение температуры резания. Именно эти преимущества касательного движения и принципиальное положение теории резания обуславливают развитие трех-, четырех- и пятиосевой обработки сложных поверхностей деталей на станках с ЧПУ.

Для описания траекторий и поверхностей резания предложен универсальный принцип продольного сложнофункционального формирования [8], который предусматривает образование поверхности, как это показано на рисунке 1.1.3, кривой линией Γ , расположенной на некоторой поверхности P и перемещающейся по ней путем движения D (в сечениях $D_1 \dots D_4$) этой поверхности в пространстве с функциональным изменением ее формы (в сечениях $P_1 \dots P_4$) и формы кривой линии (в сечениях $\Gamma_1 \dots \Gamma_4$).

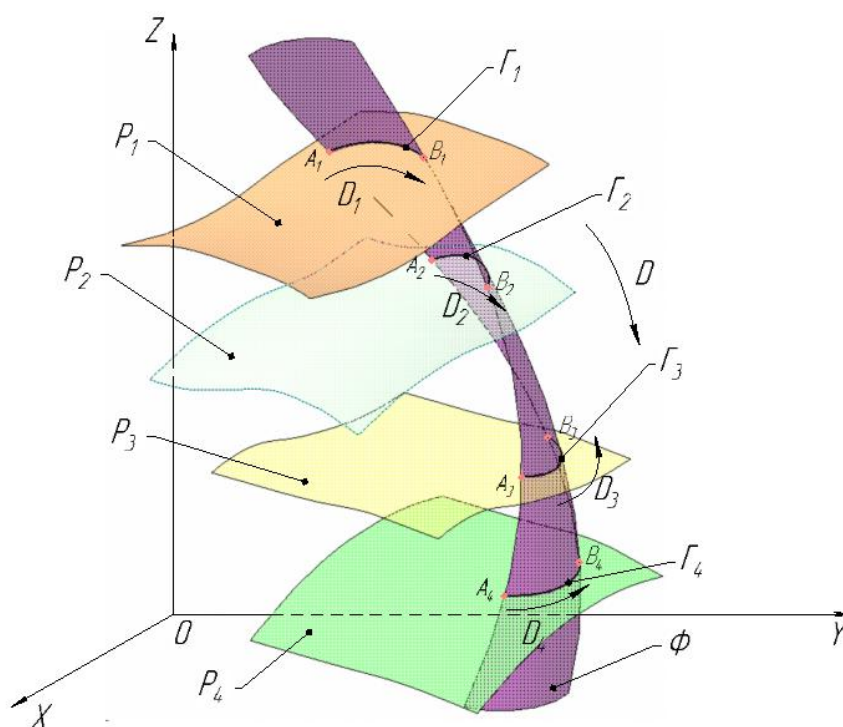


Рисунок 1.1.3. – Общая схема формирования поверхности

Образуемая при этом поверхность называется формируемой поверхностью Φ . Кривая, осуществляющая при своем пространственном движении формирование поверхности, называется формирующей линией, а поверхность на которой она расположена – формирующей поверхностью. Пространственное перемещение формирующей линии – формирующее движение, а траектория рассматриваемой точки формирующей линии в формирующем движении – след формирования.

Общий случай формирования поверхности представляет собой сложный процесс, определяемый множеством различных характеристик, которые разделяются на две группы:

- характеристики формы;
- характеристики движения.

Эти характеристики определяют:

- 1) степень сложности формирующей поверхности;
- 2) степень сложности формирующей линии;
- 3) степень изменяемости формы формирующей поверхности;
- 4) степень изменяемости формы формирующей линии;
- 5) степень свободы формирующей поверхности в пространстве;
- 6) степень свободы формирующей линии на формирующей поверхности.

Для многоосевой обработки на станках с ЧПУ, чаще всего, можно выделить четыре возможных варианта ее реализации:

1. Характер перемещения формирующей плоскости с параметром P_p (плоскость в любом случае смещается – иначе бы не было поверхности) при двух заданных вариантах перемещения:

- однокоординатное (по оси Z) ортогональное (перпендикулярное плоскости) перемещение – $P_p=0$;
- вращательное перемещение плоскости (вокруг оси X , расположенной в самой плоскости) – $P_p=1$.

2. Степень подвижности формирующей линии в формирующей плоскости с параметром P_1 :

- формирующая линия неподвижна – $P_1=0$;
- формирующая линия имеет перемещение в формирующей плоскости – $P_1=1$.

3. Степень изменяемости формирующей линии в формирующей плоскости с параметром I_1 :

- формирующая линия неизменна $I_1=0$;
- формирующая линия изменяется $I_1=1$.

4. Степень сложности формирующей линии с параметрами F_1 :

- формирующая линия прямолинейна F_1 ;
- формирующая линия криволинейна F_1 .

Получено математическое выражение, описывающее формирование линейчатой поверхности прямой линией во вращающейся плоскости, имеющие по координате z следующий вид:

$$z = \left\{ \frac{k + tg \left[n_\varphi \cdot \varphi \cdot P_p + n_z \cdot z \cdot (1 - P_p) \right]}{1 - k \cdot tg \left[n_\varphi \cdot \varphi \cdot P_p + n_z \cdot z \cdot (1 - P_p) \right]} \cdot \left[x + C_\varphi \cdot \varphi \cdot P_p + C_z \cdot z \cdot (1 - P_p) \right] \pm \right. \\ \left. \pm \frac{b}{\sqrt{1 - k^2}} \cdot \sqrt{1 + \left[\frac{k + tg \left[n_\varphi \cdot \varphi \cdot P_p + n_z \cdot z \cdot (1 - P_p) \right]}{1 - k \cdot tg \left[n_\varphi \cdot \varphi \cdot P_p + n_z \cdot z \cdot (1 - P_p) \right]} \right]^2} \right. + \quad (1.1.1) \\ \left. + P_p \cdot (m_\varphi - k \cdot C_\varphi) \cdot \varphi + (1 - P_p) \cdot (m_z - k \cdot C_z) \cdot z \right\} \cdot \sin(P_p \cdot \varphi).$$

Съем припуска с заготовки определяется возможными сочетаниями параметров режущей кромки РК и траектории Т резания в способах копирования К, огибания О и пересечения П. РК и Т являются уровнями варьирования, а К, О и П – факторами обработки. Исходя из этого, например, при обработке цилиндрической поверхности детали возможно 12 способов ее формирования и срезания припуска (таблица 1.1.1).

Таблица 1.1.1. – Способы обработки цилиндрической поверхности детали

№ способа	Образование линии формы		Образование изменения формы		Образование способа
1	Режущая кромка	Копированием (РКК)	Траектория	Копированием (ТК)	РКК – ТК
2		Огибанием (РКО)		Копированием (ТК)	РКО – ТК
3		Пересечением (РКП)		Копированием (ТК)	РКП – ТК
4		Копированием (РКК)		Огибанием (ТО)	РКК – ТО
5		Огибанием (РКО)		Огибанием (ТО)	РКО – ТО
6		Пересечением (РКП)		Огибанием (ТО)	РКП – ТО
7	Траектория	Копированием (ТК)	Режущая кромка	Копированием (РКК)	ТК – РКК
8		Копированием (ТК)		Огибанием (РКО)	ТК – РКО
9		Копированием (ТК)		Пересечением (РКП)	ТК – РКП
10		Огибанием (ТО)		Копированием (РКК)	ТО – РКК
11		Огибанием (ТО)		Огибанием (РКО)	ТО – РКО
12		Огибанием (ТО)		Пересечением (РКП)	ТО – РКП

Для трехэлементной кинематической схемы резания с двумя вращательными и одним поступательным движениями съем припуска с заготовки определяется следующим передаточным отношением:

$$i = \frac{m}{z_n} \cdot \frac{d}{D}, \quad (1.1.2)$$

Толщина срезаемого слоя для трехэлементной кинематической схемы резания может быть определена по формуле [3]:

$$a_\mu = S_o \cdot \mu \cdot \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{v_k}{v}\right)^2 + 1}} \cdot m, \quad (1.1.3)$$

и для четырехэлементной кинематической схемы резания по формуле:

$$a_\mu = S_o \cdot \mu \cdot \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{v_k}{v}\right)^2 + 1}} \cdot m \pm \frac{d}{2} \cdot (\sin \mu + 1), \quad (1.1.4)$$

Кинематические углы режущего лезвия инструмента определяются между передней и задней поверхностями режущей кромки и векторами – нормальным, касательным и скорости резания (см. рисунок 1.1.1).

Передний угол:

$$\operatorname{tg} \gamma_k = \frac{(\overline{v_e} \cdot \overline{n_n} \cdot \overline{\tau_e}) \cdot |\overline{v_e}|}{(\overline{v_e}) \cdot \overline{n_n} \cdot \left[\overline{\tau_k} \cdot \overline{v_e} \right]}, \quad (1.1.5)$$

задний угол:

$$\operatorname{tg} \alpha_k = \frac{(\overline{v_e} \cdot \overline{n_z}) \cdot \left[\overline{\tau_k} \cdot \overline{v_e} \right]}{(\overline{v_e} \cdot \overline{n_z} \cdot \overline{\tau_k}) \cdot |\overline{v_e}|}, \quad (1.1.6)$$

угол наклона режущей кромки:

$$\operatorname{tg} \lambda_k = \frac{(\overline{v_e} \cdot \overline{\tau_k})}{\left[\overline{\tau_k} \cdot \overline{v_e} \right]}. \quad (1.1.7)$$

Для подвижной системы координат X Y Z (см. рисунок 1) векторы \bar{v}_e , \bar{n}_n , \bar{n}_z и $\bar{\tau}_\kappa$ выражены через их проекции на соответствующие координатные оси и получены формулы, например, для расчета кинематического переднего угла режущего лезвия инструмента в следующем виде:

$$tg \gamma = \frac{tg \gamma_r - \frac{v_{ex_1}}{v_{ez_1}} \sin \theta + \frac{v_{ey_1}}{v_{ez_1}} \cos \theta}{1 + tg \gamma_r \left(\frac{v_{ex_1}}{v_{ez_1}} \sin \theta - \frac{v_{ey_1}}{v_{ez_1}} \cos \theta \right)} \cdot \frac{\sqrt{1 + \left(\frac{v_{ex_1}}{v_{ez_1}} \right)^2 + \left(\frac{v_{ey_1}}{v_{ez_1}} \right)^2}}{\sqrt{1 + \left(\frac{v_{ex_1}}{v_{ez_1}} \sin \theta - \frac{v_{ey_1}}{v_{ez_1}} \cos \theta \right)^2}}. \quad (1.1.8)$$

Для расчета температуры в инструменте и детали с источником теплоты в виде криволинейного треугольника, действующего в течение определенного времени, получена следующая формула:

$$\theta(r, z, t) = \frac{2q}{R^2 \cdot \lambda \cdot \sqrt{\pi k}} \cdot \left\{ l \cdot \sin^{xe} \mu (2R - l \cdot \sin^{xe} \mu) \cdot \left[2\sqrt{t} \exp\left(-\frac{z^2}{4kt}\right) - \frac{z\sqrt{\pi}}{\sqrt{k}} \cdot erfc\left(\frac{z}{2\sqrt{kt}}\right) \right] + \frac{\sqrt{\pi}}{\sqrt{k}} \cdot \sum_{\substack{\alpha \\ \alpha \neq 0}} \frac{\exp(-\alpha r) \cdot I_0(\alpha r)}{\alpha \cdot I_0^2(\alpha R)} \int_{R \cdot \sin^{xe} \mu}^R r_u I_0(\alpha r_u) \cdot \int_0^{\alpha \sqrt{kt}} \exp\left[-\left(\frac{z\alpha}{2x} - x\right)^2\right] dx \right\}. \quad (1.1.9)$$

Физические характеристики процесса резания также определяются экспериментальным путем с использованием специальных стендов, смонтированных на базе универсальных металлорежущих станков и станков с ЧПУ.

Использование универсальных устройств, регистрирующей аппаратуры, системы ЧПУ, соединенной с ЭВМ, обеспечивает одновременную фиксацию и управление в полуавтоматическом или автоматическом режимах в процессе резания скоростями движений инструмента и заготовки, геометрией их контактных поверхностей, параметрами стружкообразования, сил и температуры резания, износа лезвий и состояния поверхностей детали. Стенд может использоваться для физического моделирования и диагностики других процессов контактного взаимодействия тел, например, различных видов трения деталей машин.

На рисунке 1.1.4 показан экспериментальный стенд на базе универсально-заточного станка 1 модели 3М642 с приспособлением для наружного круглого шлифования 2. Элементы схемы смонтированы на передней панели несущей конструкции и включают программируемый логический контроллер 3, частотные преобразователи 4, операторскую панель 5 и энкодер 6.



Рисунок 1.1.4. – Стенд на базе универсально-заточного станка модели 3М642

В результате проведенных экспериментальных исследований процесса резания на вышеприведенных стендах получены следующие зависимости:

– длины контакта передней поверхности инструмента со стружкой

$$l_n = l \cdot \sin^{\mu} \mu,$$

$$l = \frac{C_1 \cdot S^{y_1}}{\left(\frac{v_k}{v_r}\right)^{z_1}}; \quad l = \frac{C_1 \cdot S^{y_1}}{v^{z_1}},$$

– коэффициента усадки стружки

$$K_a = c_k \cdot t^{x_k} \cdot v_s^{y_k} \cdot v^{z_k} \cdot \left(\frac{v_k}{v}\right)^{m_k} \cdot K_k,$$

– силы резания

$$P = C_p \cdot t^{x_p} \cdot v_s^{y_p} \cdot v^{z_p} \cdot \left(\frac{v_k}{v} \right)^{m_p} \cdot K_p,$$

– температуры резания

$$\theta = C_\theta \cdot t^{x_\theta} \cdot v_s^{y_\theta} \cdot v^{z_\theta} \cdot \left(\frac{v_k}{v} \right)^{m_\theta} \cdot K_\theta.$$

– стойкости инструмента

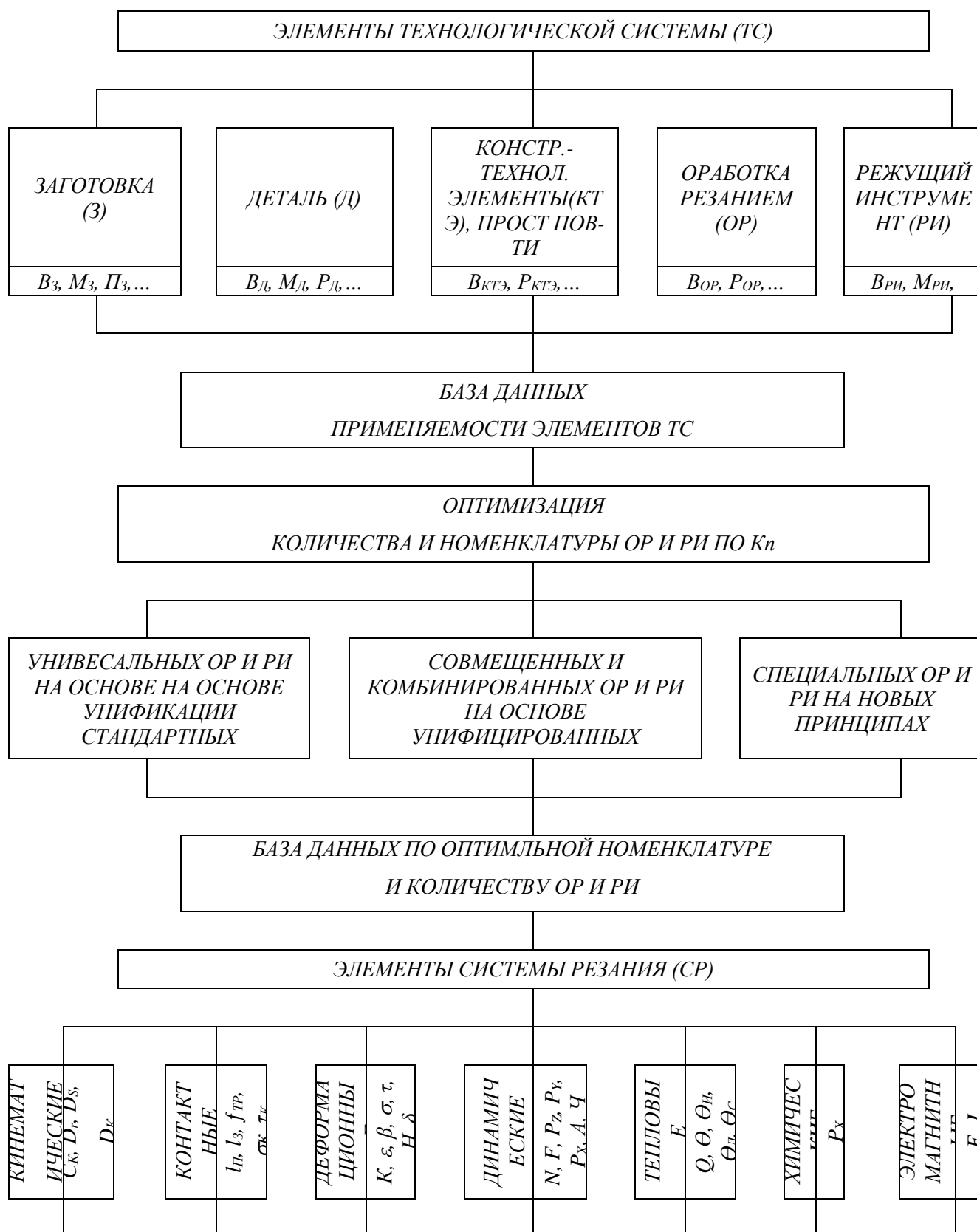
$$T = \frac{C_T \cdot K_T}{t^{x_T} \cdot v_s^{y_T} \cdot v^{z_T} \cdot \left(\frac{v_k}{v} \right)^{m_T}},$$

– качества обработанной поверхности детали

$$R_z = \frac{C_{R_z} \cdot t^{x_{R_z}} \cdot v_k^{y_{R_z}} \cdot K_{R_z}}{v^{z_{R_z}} \cdot \left(\frac{v_k}{v} \right)^{m_{R_z}}}.$$

Приведенные математические модели, описывающие кинематические и геометрические параметры, физические и технологические характеристики процесса резания, взаимосвязаны между собой и образуют систему резания. На входе этой системы находятся заготовка, инструмент, станок, приспособление и технологическая среда с собственными параметрами, объединенные кинематической схемой резания (видом обработки резанием) и режимом резания (скорость, подача, глубина резания), которые являются своеобразным и наиболее «гибким» регулятором процесса резания. Процесс резания определяется различными явлениями: деформационными, динамическими, тепловыми и электромагнитными со своими характеристиками. На выходе системы резания желательно получить наилучшие показатели, характеризующие цели обработки – производительность, качество и себестоимость. По каждому компоненту и показателю системы резания может быть сформирована база данных, введены критерии получения наилучших (оптимальных) значений показателей, то есть создана система автоматизированного проектирования процесса резания, металлорежущих станков и режущих инструментов [20].

Систему резания необходимо рассматривать во взаимосвязи с технологической и производственной системами [21]. Общая структура технологической системы ТС, включающая систему резания СР, может быть представлена схемой на рис. 1.1.5.



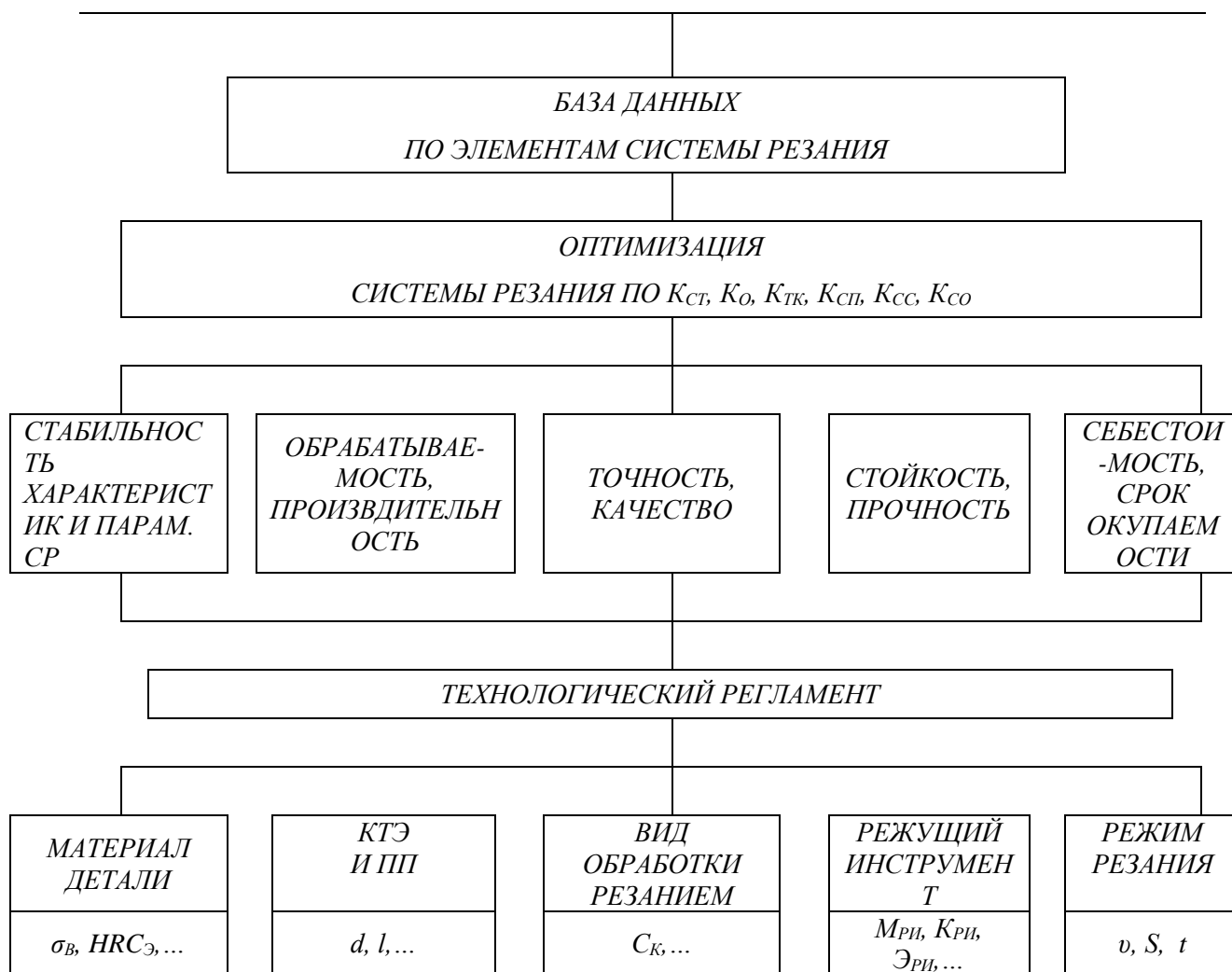


Рисунок 1.1.5. – Структура технологической системы

На входе технологической системы находятся заготовка, получаемая деталь и ее конструктивные элементы и поверхности, вид обработки, режущий инструмент и т.д., по которым формируются базы данных с учетом характеризующих их параметров (вид В, материал М, припуск П, размер Р и т.п.). Эти базы данных оптимизируются по критерию применимости номенклатуры изделий. Далее рассматриваются элементы системы резания СР и формируются их базы данных. Базы данных оптимизируются по различным критериям – стойкости, обрабатываемости и т.д. В конечном итоге формируется технологический регламент, учитывающий свойства обрабатываемого материала, форму и параметры конструктивных элементов и поверхностей детали, характеристики вида обработки резанием и типа режущего инструмента, а также режим резания. Из технологических регламентов, как из «кирпичиков», складывается весь технологический процесс

механической обработки поверхностей детали. Конечно, этот процесс должен быть дополнен технологией сборки изделий, должен учитывать условия эксплуатации и утилизации изделий, т.е. весь жизненный цикл изделия.

Таким образом, полученные математические и физические модели процесса резания в виде обобщающих теоретических и эмпирических зависимостей выходных характеристик и показателей от входных параметров обработки, а также разработанные исследовательские стенды и технологическая система, позволяют создавать единую управляющую платформу процесса резания, открытые системы ЧПУ станков со встроенными модулями нейропроцессоров и модулями связи с интернетом.

В настоящее время такие системы функционируют (например, САД системы) и используются при разработке управляющих программ станков с ЧПУ, т.е. адаптированы с САМ системами. Решается задача введения в действующие системы ЧПУ самообучающихся функциональных (электронных) блоков, которые бы позволяли системе выбирать самой (без участия оператора) наилучшие варианты обработки при изменении их условий. Данные функциональные блоки могут быть построены на нейронных сетях (искусственный интеллект) и связаны с интернетом (цифровые технологии) [23-25].

Выводы. При разработке методологии исследования процесса резания материалов должны учитываться:

1) общие тенденции циклического развития экономики – технологические уклады; наличие в стране одновременно нескольких технологических укладов; необходимость устойчивого развития – баланса природы и цивилизации, инноваций и восприимчивости к ним экономики;

2) концепции обобщения достижений науки в различных сферах деятельности (естествознании и философии), связь науки, образования («университет 1,0» ÷ «университет 4,0») и промышленности («индустрия 1,0» ÷ «индустрия 4,0»); развитие объединяющих (природоподобных) технологий – НБИК (нано, био-, инфо-, когно-) технологий;

3) результаты глубоких исследований строения материи и физико-химических процессов – частицы Хигса, наличие трех и более осей симметрии в кристаллах и других достижений.;

4) индивидуализация мелкосерийного многономенклатурного производства изделий на основе интернет-технологий, облачных технологий, искусственного интеллекта, нейронных сетей и т.п.; переход от типовых и групповых технологий к гибким модульным и мобильным технологиям; развитие трех-, четырех- и пятимерных технологий, аддитивных и гибридных технологий, автоматизации и роботизации производства;

5) повышение требований к качеству изделий, обеспечение точности деталей на наноуровне; развитие новых материалов деталей и инструментов, в том числе покрытий;

6) систематизацию обработки резанием; создание обобщенных кинематических схем резания; универсальные принципы формообразования поверхностей; моделирование явлений процесса резания; разработка многофункциональных станков и технологической оснастки, обеспечивающих на одном рабочем месте обработку различных конструктивных элементов и поверхностей деталей с наивысшей производительностью и точностью;

7) развитие высокоскоростной обработки материалов лезвийным режущим инструментом, изменение физических и химических явлений процесса высокоскоростного резания по сравнению с традиционным;

8) оптимизация и управление функционированием технологической системы по комплексному критерию (производительность, качество и себестоимость).

1.2 Методология исследования работоспособности фрезерных и осевых режущих инструментов на основе 3D прототипирования

В связи с быстроменяющимися условиями обработки материалов резанием и прежде всего, таких как увеличение скорости резания и введение программного управления процессом резания требуется корректировка и уточнение методологии исследования кинематических и физических характеристик процесса резания [26]. Эти изменения в исследованиях должны касаться всех аспектов и объектов процесса резания, но наибольшее внимание следует уделить режущим инструментам, которые хотя и составляют небольшую долю в себестоимости обработки (порядка 3-5%), но без совершенствования которых невозможно повышение эффективности процесса резания. Как известно, наибольшее применение в производстве находят сборные конструкции режущих инструментов и, прежде всего, фрезерные, осевые (сверла, зенкеры, развертки) и расточные головки [27].

Широкое использование сборных конструкций режущих инструментов при высокоскоростной обработке сдерживается их сравнительно большими габаритами, аэро- и гидравлическим сопротивлением и инерционностью масс конструктивных элементов и, как следствие, падением мощности и производительности резания.

Анализ разработок и результатов исследований сборных режущих инструментов, выполненных ведущими инструментальными фирмами: Sandvik Coromant (Швеция), Iskar (Израиль), Hermle (Германия), Korloy (Южная Корея), Mitsubishi (Япония), и также известными учеными В.А. Гречишниковым, Бобровым В.Ф., Грановским Г.И., Михайловым М.И. и другими, показывает, что многие вопросы в области оптимизации и автоматизации проектирования и изготовления сборных модульных конструкций режущих инструментов решены. Однако недостаточно внимания уделяется оптимизации формы и геометрических параметров модульных инструментов, технологий их изготовления с учетом условий обтекания воздушными и гидравлическими потоками и обеспечения стружко- и теплоотведения, статической и динамической балансировки в процессе высокоскоростного резания. Хотя в смежных областях техники, например, самолёто- и кораблестроении эти вопросы исследованы достаточно полно с представлением физических и математических моделей [28].

При изготовлении сборных режущих инструментов используются различные методы, в частности, обработка давлением и резанием, методы порошковой металлургии и 3D печати. Для каждого из этих методов требуется проектирование такой конструкции режущего инструмента, которая бы учитывала функциональное назначение режущего

инструмента, например, для высокоскоростного фрезерования или растачивания, и особенности технологий его изготовления (обработки и сборки).

Не в полной мере используются возможности «гибридных» технологий, предусматривающих 3D печать модульных деталей и узлов и их сборку традиционными методами, применение высокопрочных композиционных полимерных материалов, алюминиевых и титановых сплавов для уменьшения веса корпусных деталей и традиционных металлических (легирующих сталей, твердых сплавов) для резовых вставок (блоков).

Требуются современные конструкторско-технологические решения по улучшению аэро- и гидродинамических свойств режущих инструментов за счет применения рациональной формы корпусов, и расположения составляющих конструктивных элементов, в частности режущих лезвий, стружко- и теплоотводящих канавок и использование балансировочных механизмов.

Решение этой технически сложной задачи возможно при комплексном подходе к проектированию, предусматривающем математическое моделирование 3D конструкции, макетирование (изготовление) экспериментального образца с использованием трехмерных технологий, физическое моделирование условий резания материала макетом режущего инструмента и оптимизацию параметров режущего инструмента, выработку рекомендаций по рациональной технологии изготовления сборного режущего инструмента, что, в конечном итоге, обеспечит сокращение временных и финансовых затрат на подготовку производства сборных режущих инструментов.

Целью данной работы является совершенствование конструкций сборных режущих инструментов и сокращение времени на подготовку их производства за счет 3D макетирования и моделирования аэро- гидродинамических и тепловых условий эксплуатации.

Для достижения указанной цели поставлены следующие задачи:

- на основе анализа сборных режущих инструментов и условий их эксплуатации при высокоскоростном резании установить основные пути совершенствования их конструкций за счет улучшения аэро- гидродинамической формы корпусов и стружко-теплоотводящих канавок;
- разработать математические и физические 3D-модели, описывающие параметры форм конструктивных элементов режущих инструментов с учетом условий обтекаемости и рационального стружкотеплоотода и балансирования;
- разработать методику экспериментального исследования 3D-макетов режущих инструментов, в том числе параметров их аэро- гидродинамики и балансирования;

- установить зависимости параметров конструктивных элементов режущих инструментов от аэро- гидродинамической и тепловой нагрузок при различных скоростях и мощности резания;

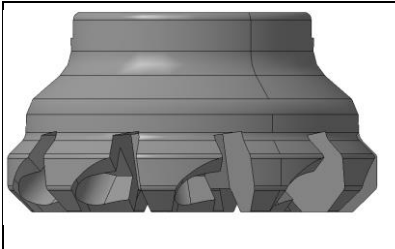
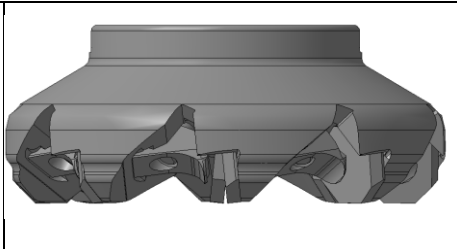
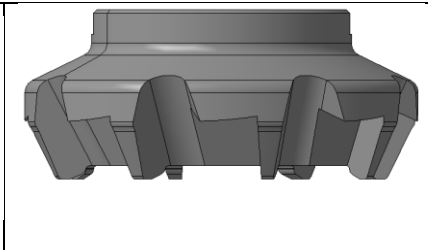
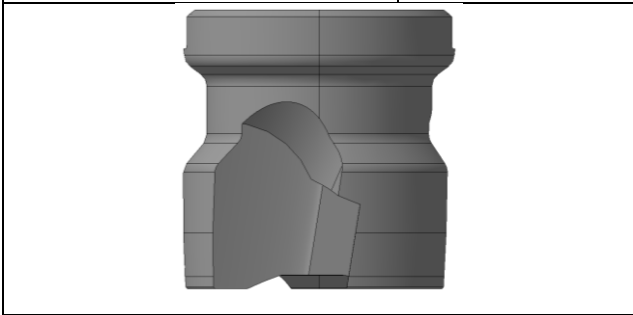
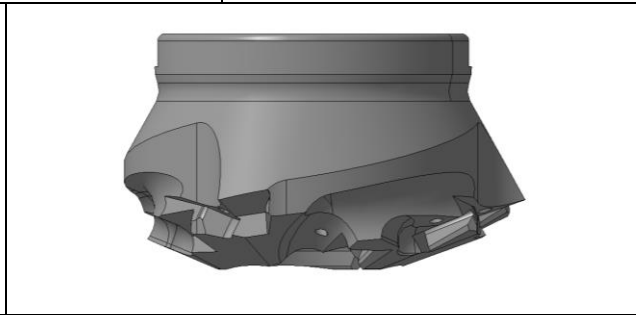
- пронормировать подготовку производства сборных режущих инструментов при их проектировании и изготовлении с использованием традиционных технологий, 3D макетирование и «гибридного» метода;

- выработать рекомендации по совершенствованию сборных режущих инструментов и сокращению времени на конструкторскую и технологическую подготовку производства.

В основу современной методологии исследований процесса резания и режущих инструментов положено математическое и физическое моделирование изменений их основных характеристик и параметров в процессе проектирования, изготовления и эксплуатации [26].

Математическое моделирование включает описание известными формулами наиболее распространенных форм корпусов режущих инструментов в виде дисков, цилиндров, конусов, торов и т.п., некоторые из которых представлены в таблице 1.2.1

Таблица 1.2.1 – Конструктивные формы торцовых фрез

		
<i>F45WG D080-10-27-FX-R08</i>	<i>SOF45WG D125-08-40-R26</i>	<i>T465 FLN D125-08-40R-22ST</i>
		
<i>HM90 F90A D 40-3-16</i>		<i>T425 SM-D050-13-3-32-13</i>

По аналогии предложены макеты конструкций в виде сочетания цилиндров (рисунок 1.2.1,а), дисков (рисунок 1.2.1,б), усеченных конусов (рисунок 1.2.1,в) и двух сопрягаемых торов (рисунок 1.2.1,г).

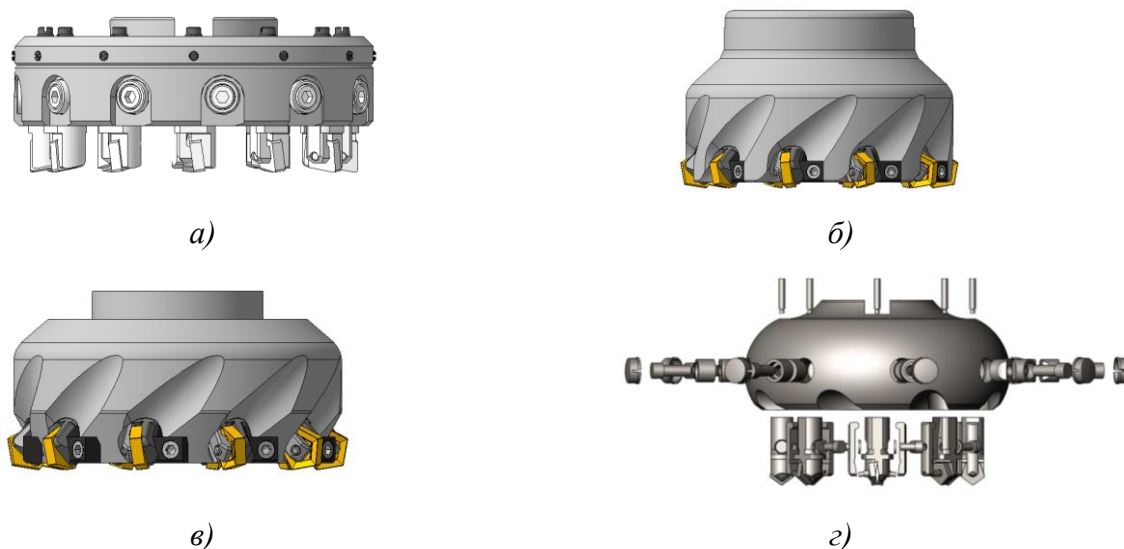


Рисунок 1.2.1. – Макеты конструкций в виде сочетаний: а) цилиндров; б) дисков; в) усеченных конусов; г) сопрягаемых торов

В настоящее время исследования в области аэро- гидродинамических характеристик режущих инструментов в вязко-жидкостной среде при высокоскоростной обработке исследованы недостаточно. Поэтому наряду с результатами исследований резания для изучения особенностей обтекания корпусов режущих инструментов можно воспользоваться моделированием летающих объектов, имеющих вращение [28]. Прежде всего на аэродинамические характеристики тел вращения влияют такие факторы, как шероховатость; геометрическая форма; площадь миделя; материал; положение обтекаемого тела относительно набегающего потока.

В зависимости от *формы* тела возможны различные случаи их обтекания воздушными потоками и влияния потоков на аэродинамические характеристики тел (рисунок 1.2.2).

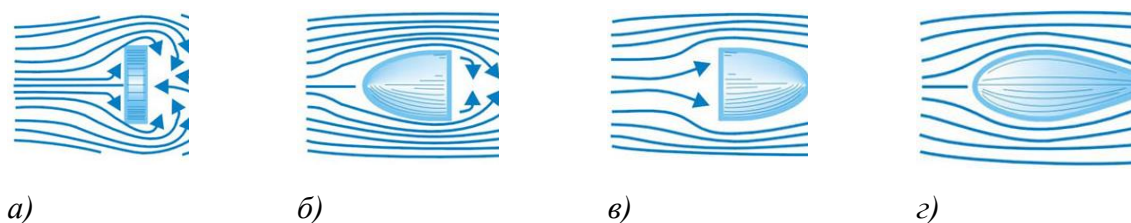


Рисунок 1.2.2. – Влияние формы тела на аэродинамические характеристики:
а) круглая пластина; б) пластина с носовым обтекателем; в) пластина с хвостовым обтекателем; г) каплевидное тело

Предложены трехмерные твердотельные модели пяти разных по форме тел вращения, но с одинаковой площадью миделевого сечения в Solid Works Simulation,

обдуваемые воздушными потоками. Результаты моделирования представлены на рисунке 1.2.3. Миделевое сечение у всех тел – это круг диаметром 100 мм.

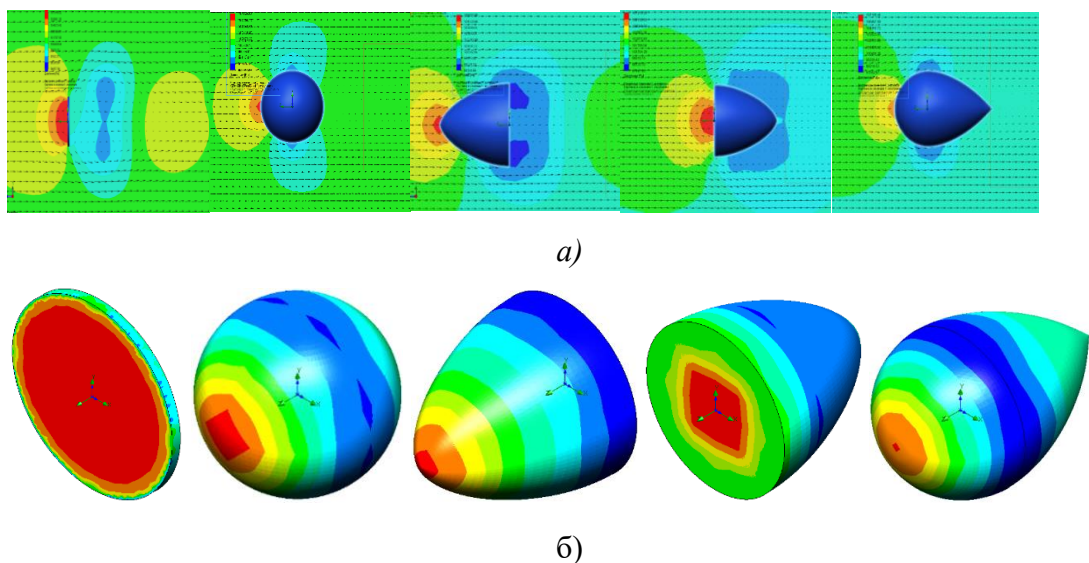


Рисунок 1.2.3. – Результаты моделирования:

а) изображение в сечениях для правой плоскости; б) изображение на поверхности, показывающие распределение давления

Зона распределения воздушных потоков для круглой пластины формируется и концентрируется по всей площади, перпендикулярной лобовому сопротивлению (рис. 1.2.3,а). Красная зона полностью отражает граничные условия распределения потоков для плоского тела вращения. Сферическое тело вращения, пластина с носовым обтекателем, а также каплевидное тело имеют воздействие на поверхностях в зонах контакта, однако за счет параметров, близких к идеальной геометрической форме «сферы», зоны концентрации распределяются по наружному контуру и сопротивление воздушным потокам сглаживается (рис. 1.2.3,б).

Сила лобового сопротивления, действующая на тело, сравнивается с теоретическими данными. При этом сила сопротивления круглой пластины принимается за единицу. Следует отметить, что программное приложение Solid Works Simulation демонстрирует свой функционал и возможности моделирования различного рода симуляций процессов, на примере несложных тел вращения. В дальнейшем возможно его применение при моделировании форм блочно-модульного режущего инструмента. Например, обтекание тороидального корпуса фрезы жидкостными или воздушными потоками может быть представлено аналогично (рис. 1.2.2, б и г) в виде схемы на рис. 1.2.4, а, а лобовое сопротивление режущей пластины в резцовом блоке по аналогии с рис.

1.2.2, а и в – в виде на рис. 1.2.4, б. В разработанных конструкциях режущих инструментов учитываются ранее предложенные рекомендации по аэро-гидродинамическим характеристикам обтекаемости тел.

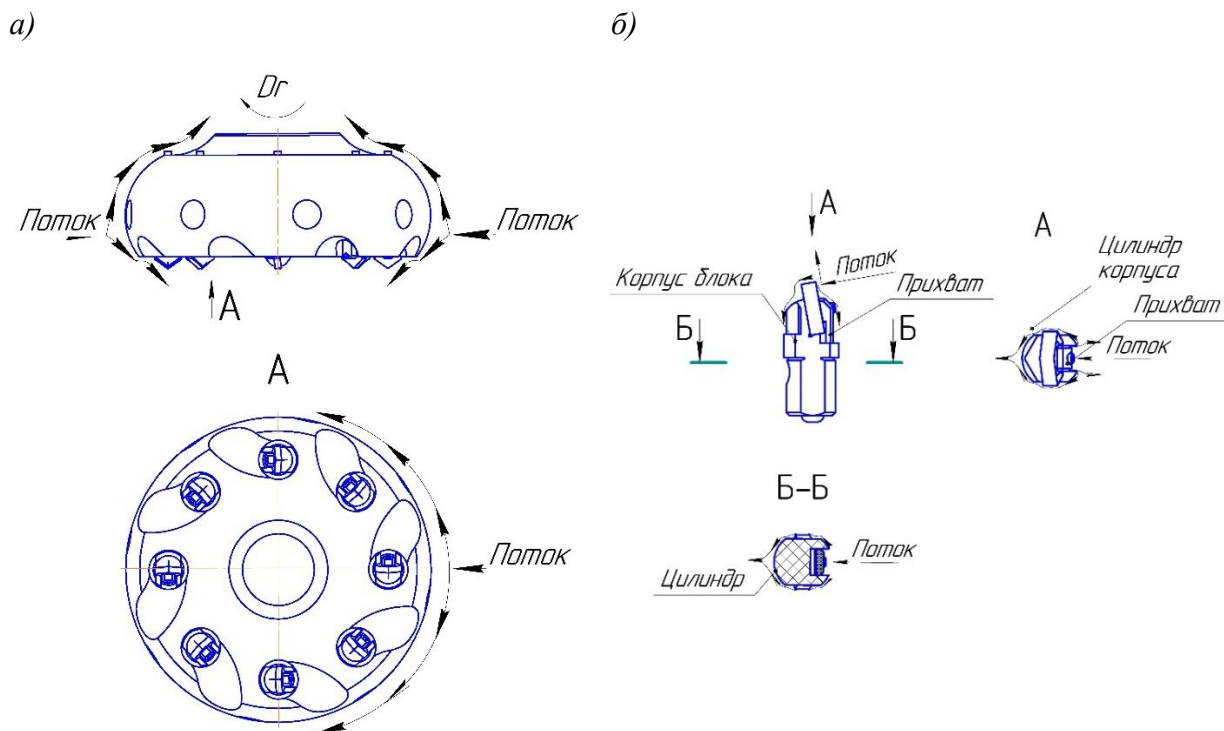


Рисунок 1.2.4. – Схемы обтекания воздушными и жидкими потоками корпусов (а) и конструктивных элементов резцовых блоков (б)

Одним из важнейших конструктивных элементов режущих инструментов является стружкоотводящая канавка. В случае высокоскоростной обработки ее можно назвать и теплоотводящей, так как порядка $75 \div 95$ % образующейся теплоты отводится из зоны резания стружкой. Здесь важно максимально учесть однонаправленность стружки и потока жидкости или воздуха, способствующих теплоотведению. Имеются аналогичные резанию физические модели обтекания вращающихся тел, например, ротационный вертушки (рис. 1.2.5,а), завихрения воздушных потоков в закрытых полостях (рис. 1.2.5,б), которые могут быть применимы и для наших случаев [29].

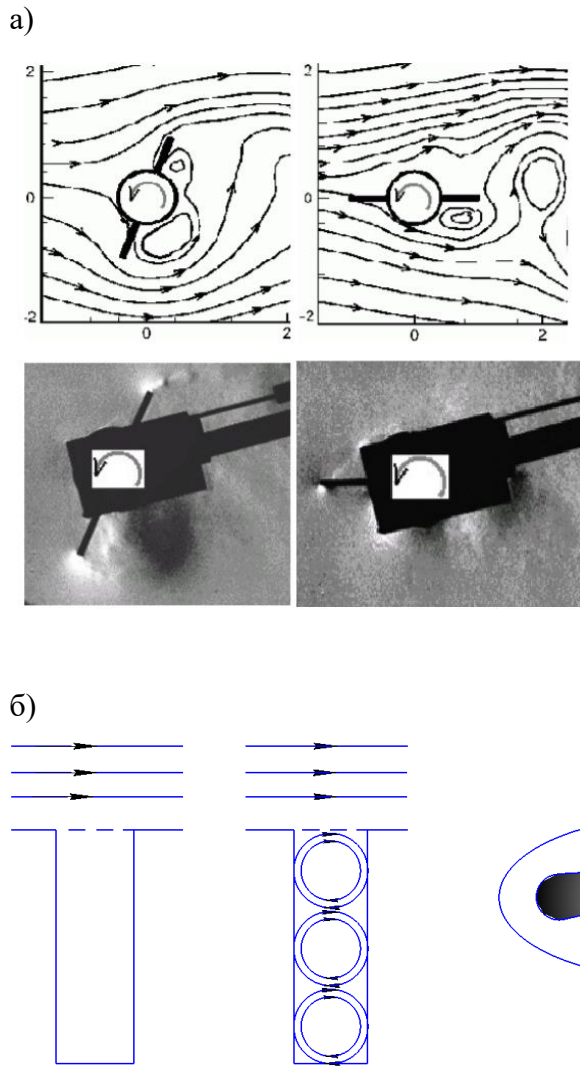


Рисунок 1.2.5. – Физические модели обтекания вращающихся тел:

а) ротационная вертушка; б) завихрения воздушных потоков в закрытых полостях

Для определения формы и расположения стружкоотводящих канавок можно воспользоваться рекомендациями исследований процесса резания.

Как известно, угол схода стружки рассчитывается по формуле [30]:

$$\operatorname{tg} \eta_{ci} = \operatorname{tg} \lambda_i \cdot \cos \gamma_i, \quad (1.2.1)$$

где λ_i и γ_i – угол наклона режущей кромки и передний угол лезвия.

и с учетом радиуса при вершине режущей пластины по формуле [31].

$$\eta_c = \eta'_c + \eta_{ck} = \eta - \left(\frac{\pi}{2} - \operatorname{arctg} \frac{\mathcal{G}_{1c}}{\mathcal{G}_{2c}} \right) + \eta_{ck}, \quad (1.2.2)$$

где $\mathcal{G}_{1c}(\tau)$ и \mathcal{G}_{2c} – проекции вектора скорости схода стружки на координатные оси x и y ;

η_{ck} – угол, учитывающий изменение направления движения стружки под действием сил на передней поверхности лезвия инструмента.

С другой стороны, из гидродинамики известна формула И. Ньютона, связывающая размеры препятствия и усилие, создаваемое обтекающей жидкостью или газом [28].

$$\partial Y = \frac{\mu \cdot \partial W \cdot S}{F}, \quad (1.2.3)$$

где Y – координата по нормали к линейной скорости вращающегося объекта;

μ – коэффициент динамической вязкости среды;

W – скорость среды;

S – площадь препятствия;

F – сила взаимодействия.

Схемы для определения угла схода стружки и координаты Y представлены на рисунке 1.2.6.

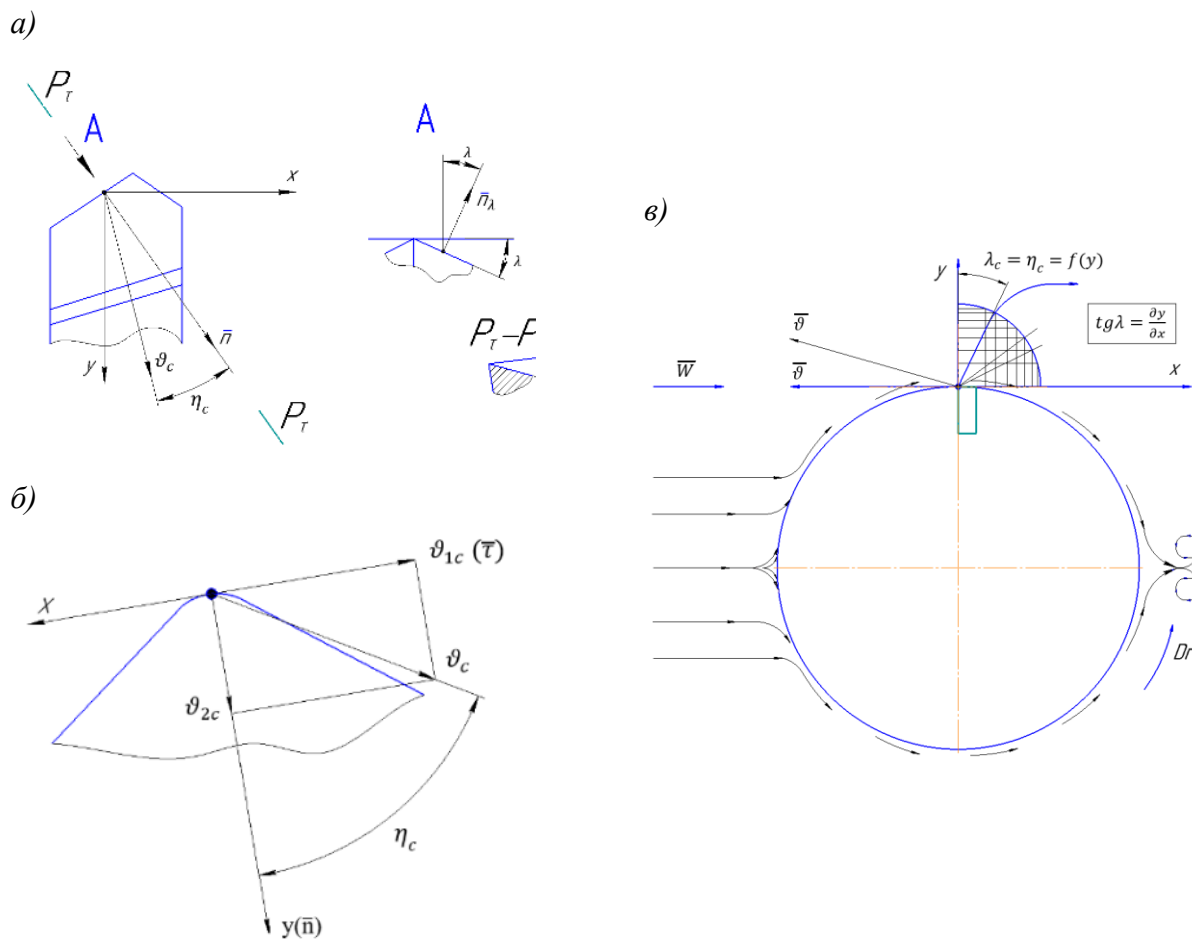


Рисунок 1.2.6. – Схемы для определения угла схода стружки (а), с учетом скорости схода стружки (б) и обтекания воздушно-жидким потоком (в)

Совместное решение уравнений (1.2.1) ÷ (1.2.3) позволяет определить значение угла схода стружкоотводящей канавки, учитывающей условия резания и обтекания режущей пластины потоком жидкости или газа.

Физическое моделирование блочно-модульных режущих инструментов (БМРИ) и их работоспособности заключалось в 3D печати макетов и их исследованию на экспериментальных стендах [32]. Проектирование и усовершенствование конструкций блочно-модульного режущего инструмента, как сложного изделия машиностроения осуществляется путем формирования трехмерной модели инструмента, так как именно создание трехмерных моделей, идентичных проектируемым конструкциям БМРИ, позволяет быстро перенастраивать инструмента для реализации целей исследования. Использование 3D параметрических моделей типовых деталей конструкции позволяет существенно повысить эффективность конструирования в среде CAD систем [33]. Однако на этапах подготовки трехмерных моделей к печати следует оценивать технические характеристики используемых 3D принтеров и материалов с последующей корректировкой геометрических размеров, оказывающих влияние на точность печати трехмерных экспериментальных макетов БМРИ. Были напечатаны макеты, представленные на рисунке 1.2.7.

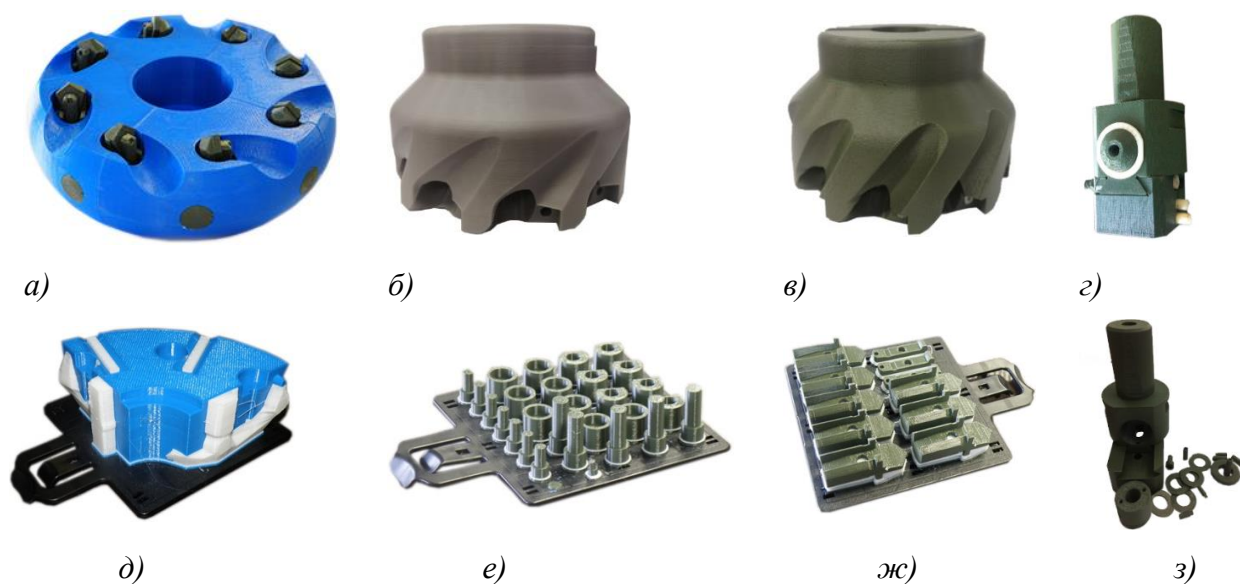


Рисунок 1.2.7. – Макеты конструкций блочно-модульных торцовых фрез, расточного патрона и основных элементов, выполненных с применением технологии трёхмерной печати: а –торовая фреза; б и в – цилиндро-конические корпуса фрез; г – цилиндрический корпус расточного патрона; д – сегмент корпуса фрезы; е-з – сухари, винты, корпуса блоков резцовых

Физическое моделирование работоспособности БМРИ реализовывалось на фрезерном станке с ЧПУ модели «Robodrill» (фирма «Fanuc», Япония). Использовались макеты сборных режущих инструментов, отпечатанных на 3D принтерах из различных пластиковых материалов. Макеты устанавливались в инструментальном магазине станка и погружались в емкость с подкрашенной жидкостью (рисунок 1.2.8). При моделировании регулировалась частота вращения инструмента и велась видеосъемка потоков жидкости, обтекающих конструктивные элементы режущих инструментов.

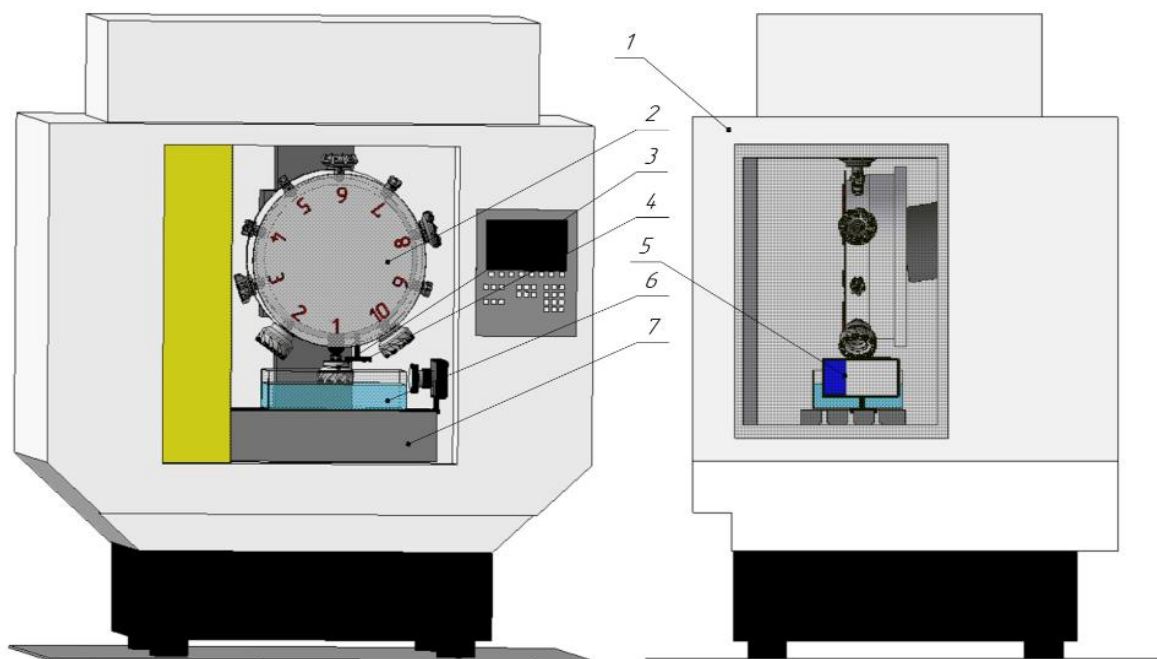


Рисунок 1.2.8. – Физическая модель для исследования работоспособности конструкции БМРИ:

1 – вертикально-обрабатывающий центр с ЧПУ Robodrill a-D21LiB; 2 – магазин станка; 3 – блочно-модульная торцовая фреза; 4 – камера Huawei P20 Pro; 5 – зеркальный фотоаппарат Canon 1200D; 6 – ёмкость с жидкостью; 7 – стол станка

Моделирование балансирования. Разработана модель балансировочного механизма в виде двух колец со спиральными пазами. Особенностью конструкции двух балансировочных колец является возможность изменения корректирующей массы в противофазе дисбалансу БМРИ, добавленной за счет перемещения груза (шарика) определенной массы в пазу по спирали Архимеда [34]. Макет БМРИ с устройством балансирования представлен на рисунке 1.2.9.

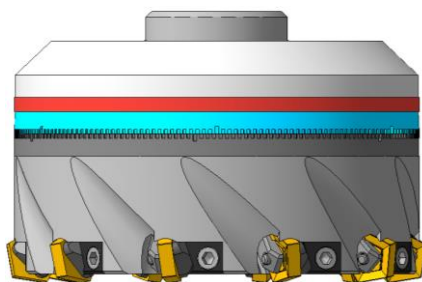


Рисунок 1.2.9. – Макет блочно-модульного режущего инструмента с устройством балансирования

Модель теплового воздействия. Целью моделирования процесса нагрева макета блочно-модульного режущего инструмента являлась качественная оценка тепловых деформаций основных конструктивных элементов (в пределах текучести пластика) и выработка рекомендаций по корректировке (совершенствованию) рабочих чертежей. Наглядное представление об изменениях винта в процессе нагрева представлено на рисунке 1.2.10. Время температурного воздействия на винт занимает 3 секунды.

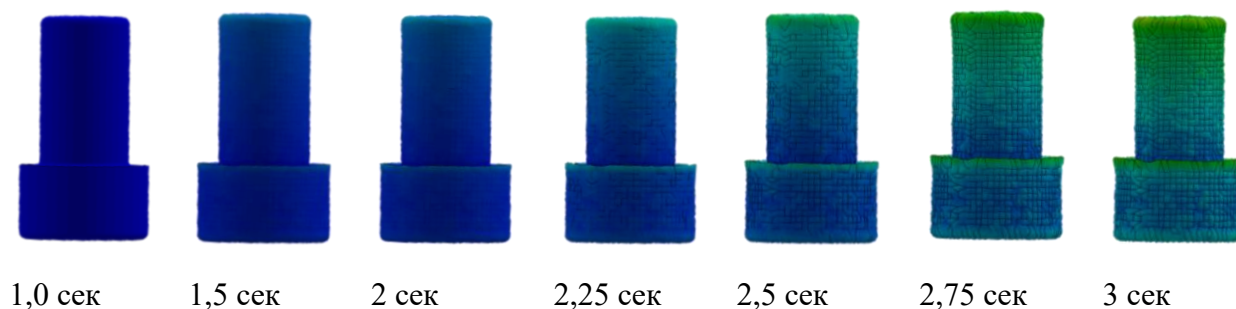


Рисунок 1.2.10. – Схема представления изменений винта в процесс нагрева

Процесс нагрева модуля блока резцового наглядно представлен на рисунке 1.1.11.



Рисунок 1.2.11. – Схема изменений в процессе нагрева блока резцового

Время температурного воздействия на корпус блока резцового занимает 5 секунд, наглядное изменение блока резцового в процессе нагрева представлено на рисунке 1.2.12.

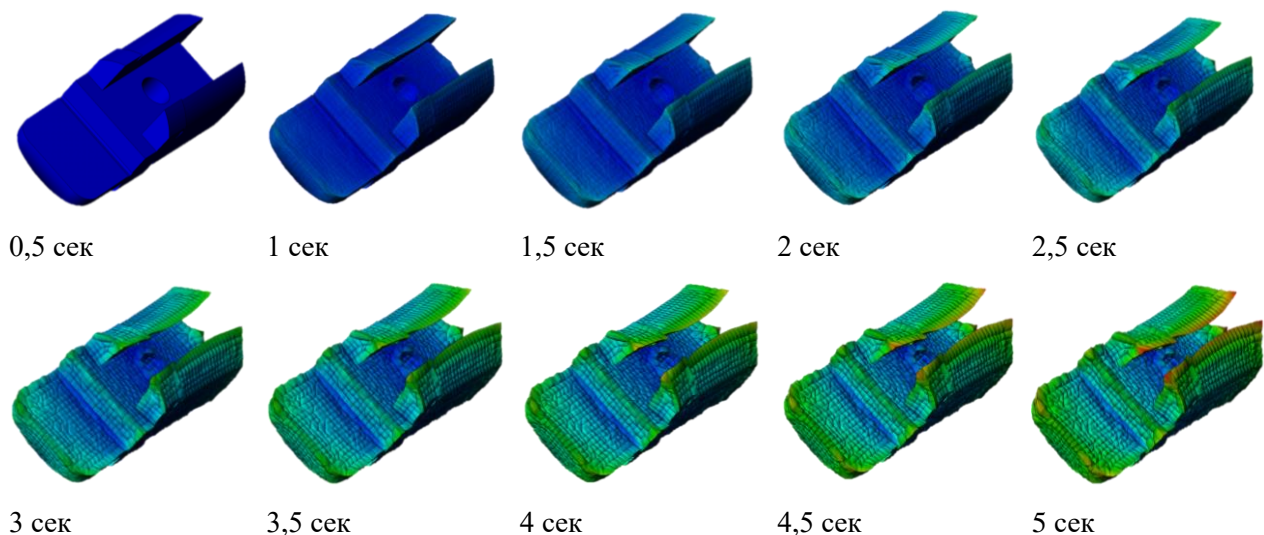


Рисунок 1.2.12. – Наглядное представление изменений в процессе нагрева корпуса блока
резцового

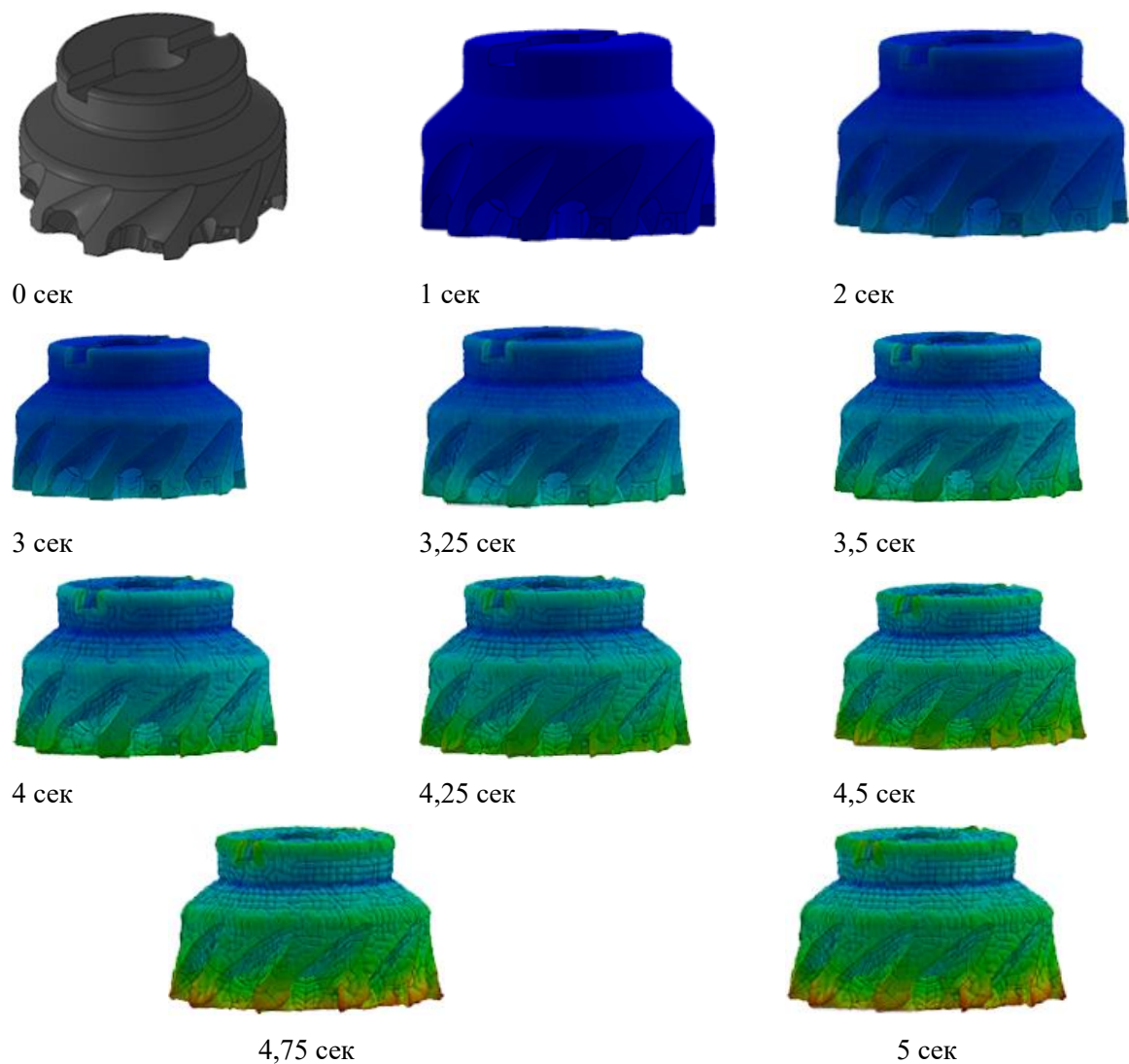


Рисунок 1.2.13. – Схема наглядного представления изменений в процесс нагрева корпуса

В результате моделирования тепловых деформаций можно отметить следующее:

1. При нагреве крепежного винта он удлиняется, что необходимо учитывать при проектировании резьбового соединения.

2. Режущая пластина увеличивается в «диаметральном» размере, что необходимо учитывать при определении размера паза для её размещения;

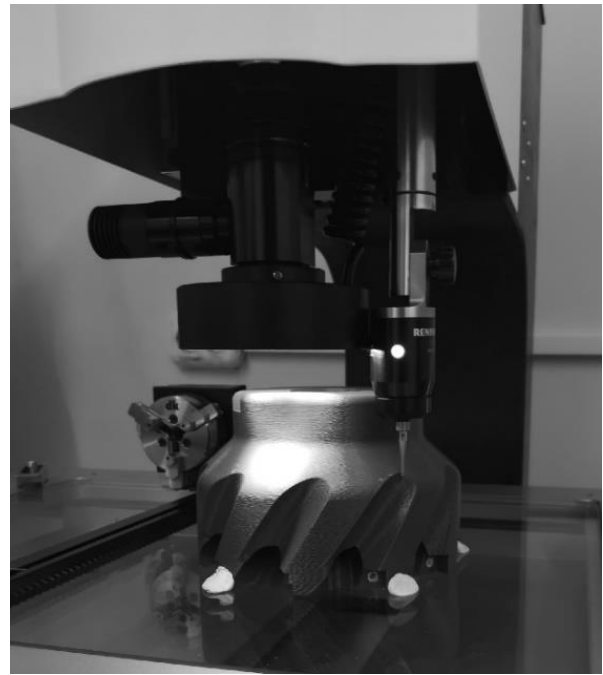
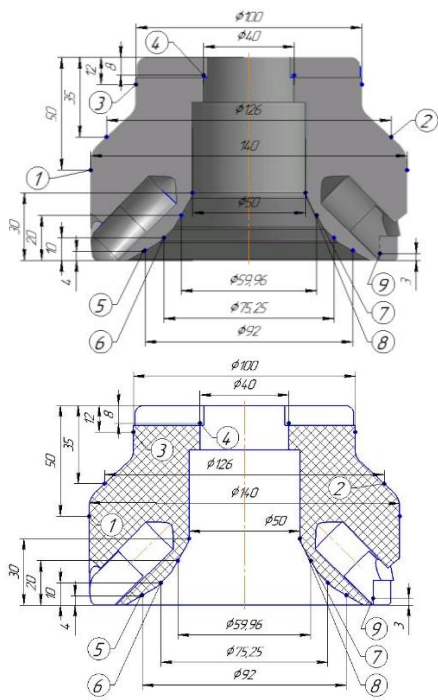
3. Корпус блока резцового увеличивается в размерах, наибольшей тепловой деформации подвергаются боковые стенки продольного паза для размещения прихвата, что необходимо учитывать при назначении допусков на ширину паза и прихвата.

4. Тепловые деформации отдельных конструктивных элементов блока резцового сказываются на общей деформации блока резцового в сборе – режущая пластина «врастает» в корпус и прихват, размеры прихвата изменяются по высоте, ширине и длине, деформируется форма отверстия под штифт, увеличивается диаметр штифта и диаметр винта зажимного. Эти тепловые деформации должны быть учтены при размерном анализе сборки резцового блока.

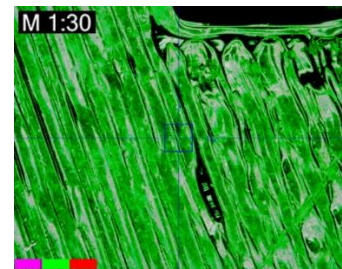
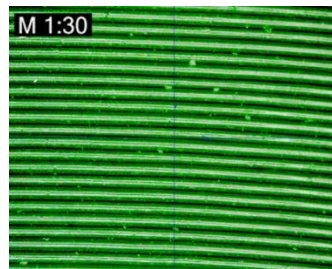
5. Качественные изменения тепловых деформаций торцовой фрезы свидетельствуют о максимальных их значениях в режущей пластине и блоке резцовом, однако ими нельзя пренебрегать и при проектировании корпуса фрезы, особенно в части торцовой шпонки, с помощью которой фреза закрепляется в хвостовике.

Моделирование изменений точностных параметров БМРИ за счет усадки материалов. При изготовлении макетов режущих инструментов с использованием 3D-технологий оценивалось соответствие получаемых размеров и шероховатости поверхностей заданным на чертеже. Естественно, предположить, что точность и шероховатость поверхностей деталей будет зависеть от особенностей трехмерной технологии и свойств используемых материалов [34].

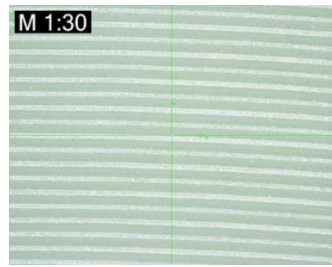
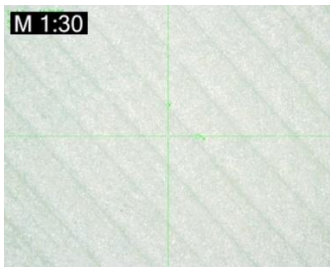
На рисунке 1.2.14 представлена схема измерения геометрических параметров формообразующего геометрического профиля режущего инструмента и структура наружной поверхности на примере блочно-модульных торцовых фрез, где указанные позиции 1-9 отображают последовательность измерений с периодичностью в 10 точек с вычислением среднего значения размера в каждой из них с использованием видеоизмерительного микроскопа модели NVM-4030D фирмы NORGAU.



а)



б)



в)

Рисунок 1.2.14. – Эскиз БМРИ и экспериментальная установка измерения его геометрических параметров (а) и структура наружной поверхности, напечатанных: б – из пластика ABSplus-P430 на 3D принтере Stratasys Mojo; в – из PLA-пластика Wanhao на 3D принтере Mass Portal Pharaoh XD 30

Изучение структуры и шероховатости поверхностного слоя деталей показывает, что плоское наложение слоев материала и их пересечение различно для рассматриваемых способов и степени заливки материалов – для 100% - 6,3 мкм, и для 50% 6,8мкм.

Анализ результатов оценки параметров точности и шероховатости поверхностей деталей показывает, что для свободных или нерабочих размеров поверхности и конструктивных элементов степень точности, обеспечиваемая 3D принтерами достаточна, а для сопрягаемых поверхностей пазов торцевой шпонки, отверстий для установки блоков резовых и других требуется дополнительный подбор материала, учитывающий толщину и свойства нити, отработка технологии 3D печати.

Оценка затрат при использовании различных технологий производств БМРИ.
Как показали эксперименты и расчеты (таблица 1.2.2).

Таблица 1.2.2. – Оценка затрат на изготовление БМРИ различными методами

<i>Метод изготовления:</i>	<i>Традиционный</i>	<i>Аддитивный</i>	<i>Гибридный</i>
Стоимость руб.	≈1000	≈ 350	≈ 720

Применение «гибридного» метода изготовления макета блочно-модульного режущего инструмента из полимерного материала позволяет экономить средства, а также сократить время на конструкторскую и технологическую подготовку производства по сравнению с традиционным методом. Однако этот метод уступает аддитивному методу, для которого нет необходимости в дорогостоящей технологической оснастке, инструментах, большом количестве металлообрабатывающего оборудования, и, кроме того, аддитивный метод позволяет отработать каждый элемент конструкции БМРИ на стадии проектирования [36,37].

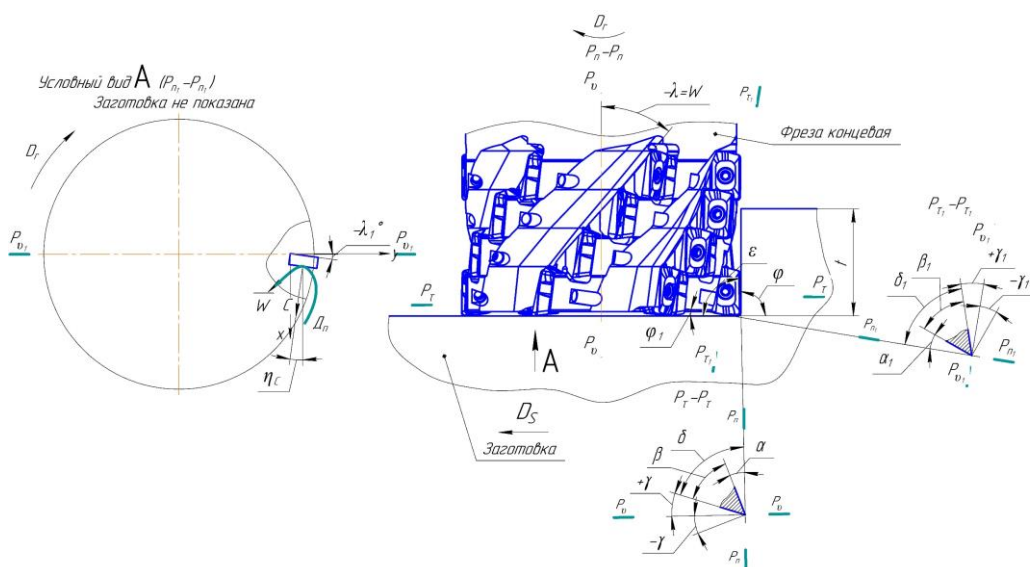
Выводы. Разработанные методики и модели позволяют проводить комплексные исследования работоспособности сборных режущих инструментов и, в частности, оценивать целесообразность принимаемых технических решений по совершенствованию конструкций фрезерных и осевых инструментов:

- использованию обтекаемых корпусов в виде двух сопрягаемых торцов;
- выполнению стружкоотводящих канавок, учитывающих направления схода стружки и потока охлаждающей жидкости или воздуха;
- введению в конструкцию балансировочных механизмов в виде уравновешивающих грузов и дисков с кольцевыми и спиральными канавками;
- повышению точности и качества получаемых конструктивных элементов и поверхностей с учетом теплового расширения и усадки полимерного материала;

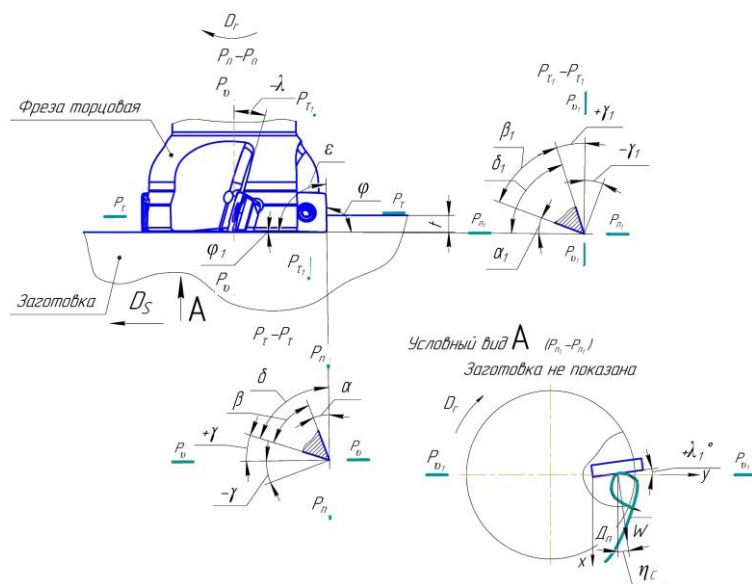
- применению «гибридных» конструкций сборных режущих инструментов и технологий их изготовления, включающих пластиковые корпуса из высокопрочных полимеров и металлические резцовые вставки с механизмами зажима;
- оценки экономической эффективности традиционных, аддитивных и гибридных конструкций и технологий.

1.3 Моделирование и регулирование стружкообразования и потоков смазочно-охлаждающей технологической среды при фрезеровании

Рассмотрим схемы обработки и геометрические параметры лезвий концевой и торцевой фрез (рисунок 1.3.1). Отличительными особенностями представленных схем обработки являются следующие, во-первых, на них изображено встречное фрезерование, когда векторы линейной скорости главного движения D_G и движения подачи D_S в зоне резания имеют разные направления, движение потока D_{II} СОТС с линейной скоростью W направлено против главного движения резания D_G (условный вид А); во-вторых, глубина резания t при фрезеровании торцевой фрезой не превышает ширины режущей пластины, а при фрезеровании концевой фрезой – определяется высотой (шириной) уступа детали; в третьих, угловые параметры лезвия – угол β заострения лезвия, передний γ и задний α углы, главный φ и вспомогательный φ_1 углы в плане лезвия, угол при вершине ε рассматриваются как для главной, так и для вспомогательной (с индексом 1) режущих кромок; в четвертых, режущие кромки имеют соответствующие углы наклона λ и λ_1 , определяемые в плоскости резания $P_n - P_n$ между режущей кромкой и основной плоскостью $P_V = P_V$; угол λ для концевых фрез часто обозначается как угол ω , значения λ могут иметь как положительные так и отрицательные знаки – принято, что если главная режущая кромка расположена выше основной плоскости, то значения угла λ положительные, для вспомогательной режущей кромки знаки значений угла λ_1 обратные по отношению к λ .



а)



б)

Рисунок 1.3.1. — Схемы обработки и геометрические параметры лезвий концевой (а) и торцевой (б) фрез

Угол схода стружки η_c зависит от угла наклона режущей кромки λ или λ_i и переднего угла γ или γ_i лезвия режущего инструмента и определяется следующим соотношением [30]:

$$\operatorname{tg} \eta_{ci} = \operatorname{tg} \lambda_i \cdot \cos \gamma_i, \quad (1.3.1)$$

где λ_i и γ_i – соответственно углы наклона режущей кромки и передние углы для главной и вспомогательной режущих кромок лезвия режущего инструмента.

В зависимости от знака и значений углов λ_i и γ_i изменяется направление угла схода стружки η_c . Возможны три варианта расположения режущей кромки: с нулевым, отрицательным и положительным значениями угла λ_i . При нулевом и отрицательном значениях угла λ_i стружка будет сходиться в сторону обрабатываемой поверхности или периферии фрезы вдоль оси ее вращения, при положительных значениях λ_i – в сторону обработанной поверхности, что нежелательно (главный вид на рис.1, а и б). Для вспомогательной режущей кромки при отрицательных значениях λ_i (условный вид А на рис. 1.3.1, а) стружка будет сходиться в сторону оси фрезы, при нулевых и положительных значениях $+\lambda_i$ (условный вид А на рис. 1.3.1, б) – в сторону периферии фрезы, что является более предпочтительным.

Угол наклона режущей кромки λ_i влияет не только на угол схода стружки, но и на механико-физические характеристики процесса резания. Установлено [30, 39], что увеличение значений угла наклона режущей кромки λ_i до $45-60^\circ$ способствует снижению сил трения, однако при этом возрастает осевая составляющая силы резания. Поэтому отечественные [40] и зарубежные стандарты [41] рекомендуют принимать значения угла наклона режущих кромок у концевых и торцовых фрез в пределах $20-45^\circ$ в зависимости от свойств обрабатываемого и инструментального материалов, размеров фрез, геометрических параметров зубьев и т.п.

Для учета влияния механико-физических характеристик фрезерования на выбор угла схода стружки воспользуемся ранее полученными зависимостями [42] для силы резания N , действующей по нормали к режущей кромке:

$$N = \frac{N_{yz}}{\cos \theta} \cdot \cos(\theta + \gamma_i), \quad (1.3.2)$$

где $N_{yz} = P_z' \cdot \frac{\cos(\lambda_i - \nu)}{\cos \nu}$ – нормальная сила, действующая вдоль поверхности резания,

γ_i – передний угол лезвия,

λ_i – угол наклона режущей кромки,

$\text{tg} \nu = \frac{P_y}{P_z}$ – вспомогательный угол,

$\text{tg} \theta = \frac{P_x'}{N_{yz}}$ – вспомогательный угол,

$P_z' = P_z - F_{1z}$ – часть главной составляющей силы резания,

$P_x' = P_x - N_1$ – часть осевой составляющей силы резания,

F_{1z} – сила трения, действующая на поверхности резания вдоль оси z в сторону, обратную рабочему движению инструмента,

N_1 – сила, направленная к поверхности резания.

Примем согласно рекомендациям [30] силу трения F_{1z} и нормальную силу N_1 со стороны задней поверхности лезвия равными нулю, тогда $P_z' = P_z$, $P_x' = P_x$ и получим:

$$N = P_z \cdot \frac{\cos(\lambda_i - \nu)}{\cos \nu \cdot \cos \theta} \cdot \cos(\theta + \gamma_i), \quad (1.3.3)$$

Выведем из выражения (1.3.3) угол наклона режущей кромки λ_i :

$$\lambda_i = \nu \pm \arccos \left[\frac{N \cdot \cos \nu \cdot \cos \theta}{P_z \cdot \cos(\theta + \gamma_i)} \right]. \quad (1.3.4)$$

Подставим выражение (1.3.4) в формулу (1.3.1) для угла схода стружки и получим:

$$\eta_{ci} = \arctg \left[\cos \gamma_i \cdot \operatorname{tg} \left(\nu \pm \arccos \left[\frac{N \cdot \cos \nu \cdot \cos \theta}{P_z \cdot \cos(\theta + \gamma_i)} \right] \right) \right], \quad (1.3.5)$$

где $\operatorname{tg} \nu = \frac{P_y}{P_z}$,

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{P_x}{N_{yz}} = \frac{P_x \cdot \cos \nu}{P_z \cdot \cos(\lambda_i - \nu)}.$$

Для заданных значений $P_z = 300 \div 10000$ Н, соотношений $P_x = (0,2 \div 0,5) \cdot P_z$ и $P_y = (0,3 \div 0,6) \cdot P_z$ и угла $\gamma_i = 5 \div 15^\circ$ и $15 \div 30^\circ$ был произведен расчет значений углов наклона режущей кромки и схода стружки, фрагменты которого представлены в таблицах 1.3.1, 1.3.2 и на рисунках 1.3.2, 1.3.3.

Таблица 1.3.1. — Данные значений λ_i и η_{ci} при $\gamma_i = 5 \div 15^\circ$ и $N = 300 \div 900$ Н

Единицы измерения – градусы (°)						
N, Н	$\gamma_i = 5^\circ$		$\gamma_i = 10^\circ$		$\gamma_i = 15^\circ$	
	$\lambda_i, ^\circ$	$\eta_{ci}, ^\circ$	$\lambda_i, ^\circ$	$\eta_{ci}, ^\circ$	$\lambda_i, ^\circ$	$\eta_{ci}, ^\circ$
300	88,98	88,97	87,75	87,74	86,33	86,20
400	83,08	83,05	1,73	81,70	80,13	79,79
500	76,90	76,86	75,40	75,35	73,57	73,02
600	70,31	70,25	68,61	68,54	66,48	65,71
700	63,12	63,03	61,12	61,03	58,54	57,65
800	54,92	54,82	52,45	52,35	49,10	48,12
900	44,83	44,72	41,34	41,23	36,04	35,09
Единицы измерения – радианы (рад)						
N, Н	$\gamma_i = 0,0872$ рад		$\gamma_i = 0,1744$ рад		$\gamma_i = 0,2616$ рад	
	$\lambda_i, \text{рад}$	$\eta_{ci}, \text{рад}$	$\lambda_i, \text{рад}$	$\eta_{ci}, \text{рад}$	$\lambda_i, \text{рад}$	$\eta_{ci}, \text{рад}$
300	1,5521	1,5520	1,5307	1,5305	1,506	1,5037
400	1,4493	1,4488	1,4257	1,4252	1,3978	1,3919
500	1,3416	1,3407	1,3154	1,3144	1,2834	1,2739
600	1,2267	1,2255	1,1969	1,1967	1,1596	1,1468
700	1,1011	1,0995	1,0663	1,0647	1,0212	1,0056
800	0,9581	0,9563	0,9149	0,9132	0,8566	0,8394
900	0,782	0,780	0,7212	0,7293	0,6286	0,6123

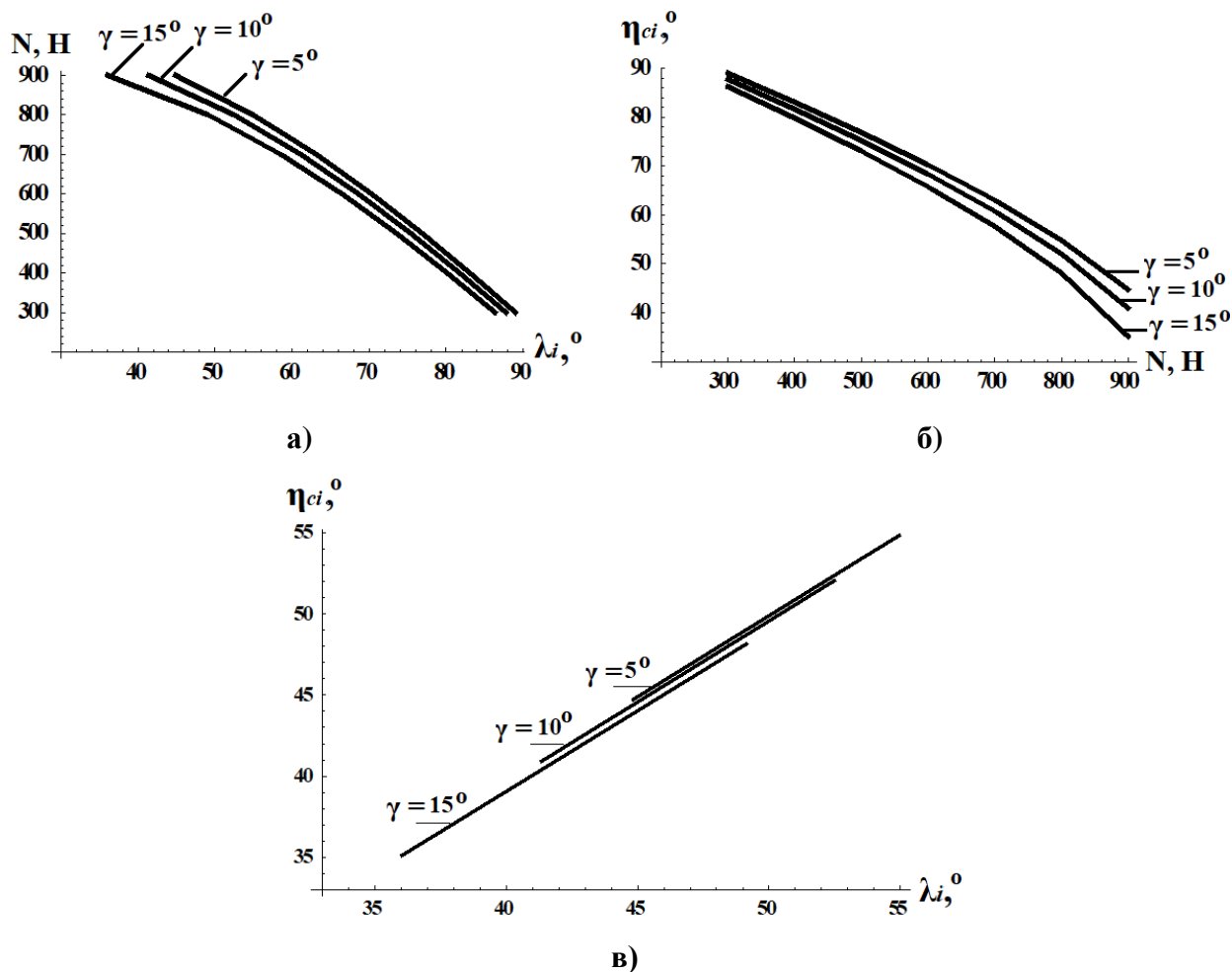


Рисунок 1.3.2. — Зависимости нормальной силы N от угла наклона режущей кромки λ_i (а); угла схода стружки η_{ci} от нормальной силы N (б) и угла наклона режущей кромки λ_i (в) при различных значениях переднего угла γ_i

Таблица 1.3.2. — Данные значений λ_i и η_{ci} при $\gamma_i = 15 \div 30^\circ$ и $N = 3000 \div 8000 \text{ Н}$

Единицы измерения – градусы (°)								
N, H	$\gamma_i = 15^\circ$		$\gamma_i = 20^\circ$		$\gamma_i = 25^\circ$		$\gamma_i = 30^\circ$	
	$\lambda_i, ^\circ$	$\eta_{ci}, ^\circ$	$\lambda_i, ^\circ$	$\eta_{ci}, ^\circ$	$\lambda_i, ^\circ$	$\eta_{ci}, ^\circ$	$\lambda_i, ^\circ$	$\eta_{ci}, ^\circ$
2000	92,32	-87,75	90,9	-89,2	89,28	89,2	87,4	87
3000	86,35	86,23	84,72	84,38	82,8	82,06	80,53	79,09
4000	80,16	79,81	78,25	77,52	75,97	74,58	73,21	70,78
5000	73,59	73,05	71,36	70,25	68,62	66,63	65,2	61,92
6000	66,5	65,76	63,82	62,38	60,42	57,95	56,05	52,14
7000	58,56	57,66	55,2	53,51	50,75	47,97	44,56	40,47
8000	49,12	48,13	44,48	42,7	37,57	34,88	22,48	19,72

Единицы измерения – радианы (рад)								
$N, Н$	$\gamma_i = 0,2616 \text{ рад}$		$\gamma_i = 0,3488 \text{ рад}$		$\gamma_i = 0,436$		$\gamma_i = 0,5232 \text{ рад}$	
	$\lambda_i, \text{ рад}$	$\eta_{ci}, \text{ рад}$	$\lambda_i, \text{ рад}$	$\eta_{ci}, \text{ рад}$	$\lambda_i, \text{ рад}$	$\eta_{ci}, \text{ рад}$	$\lambda_i, \text{ рад}$	$\eta_{ci}, \text{ рад}$
2000	1,6099	-1,5305	1,5852	-1,555	1,557	1,555	1,5243	1,5171
3000	1,5060	1,5037	1,4774	1,4715	1,4439	1,4309	1,4043	1,3792
4000	1,3978	1,3919	1,3646	1,3518	1,3248	1,3006	1,2767	1,2344
5000	1,2834	1,2739	1,244	1,2251	1,1966	1,1619	1,1371	1,0799
6000	1,1596	1,1468	1,1129	1,0878	1,0537	1,0105	0,9774	0,9093
7000	1,0211	1,0056	0,9626	0,9332	0,8851	0,8365	0,777	0,7057
8000	0,8566	0,8394	0,7757	0,7447	0,6551	0,6083	0,3921	0,344

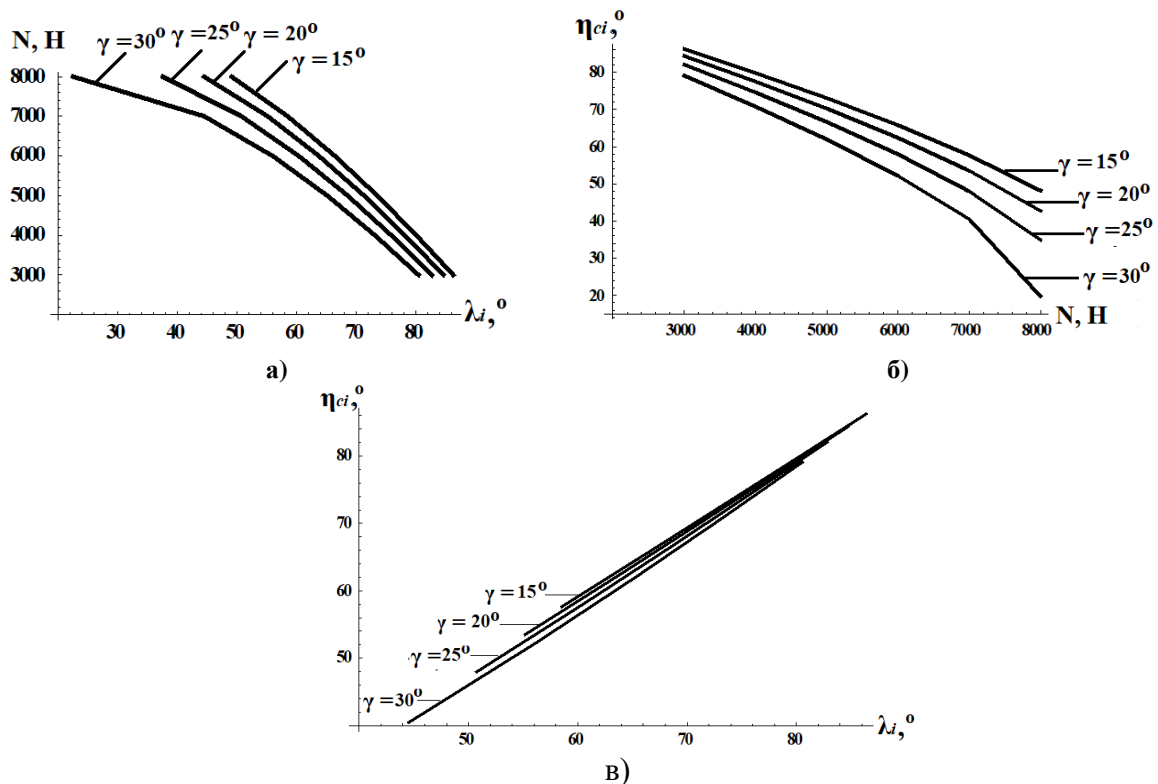


Рисунок 1.3.3. — Зависимости нормальной силы N от угла наклона режущей кромки λ_i (а); угла схода стружки η_{ci} от нормальной силы N (б) и угла наклона режущей кромки λ_i (в) при различных значениях переднего угла γ_i

Как видно из графиков, с увеличением угла λ_i , нормальная сила N уменьшается, причем ее значения тем меньше, чем больше значения переднего угла γ_i . Уменьшение N способствует увеличению η_{ci} , угол η_{ci} также возрастает при увеличении λ_i . При увеличении соотношений P_x/P_z и P_y/P_z нормальная сила несколько возрастает, что необходимо учитывать при выборе значений λ_i и η_{ci} .

Характерные изменения кривых на графиках (резкие переходы и сдвиги значений) обусловлены влиянием тригонометрических функций \sin , \cos и tg .

Рассмотрим аэро-гидродинамические условия работы вращающейся фрезы в смазочно-охлаждающей технологической среде (условный вид А на рисунке 1.3.1). При высокоскоростной обработке СОТС подается в зону резания в распыленном состоянии в виде жидко-газового конденсата. Поверхности и режущие кромки вращающейся фрезы захватывают и перераспределяют потоки СОТС согласно описываемым математическим и физическим моделям [28, 43]. В частности, изменение координаты препятствия (в нашем случае это высота режущей пластины и глубина (ширина) стружкоотводящей канавки) предлагается определять по формуле И. Ньютона:

$$\partial y = \frac{\mu \cdot \partial W \cdot S}{F}, \quad (1.3.6)$$

где ∂y – изменение координаты препятствия по нормали к линейной скорости потока СОТС, м;

μ – коэффициент динамической вязкости среды, Па·с;

∂W – изменение скорости потока СОТС, м/с;

S – площадь препятствия, м²;

F – сила взаимодействия СОТС и препятствия, Н.

Процесс схода стружки при высокой температуре резания может быть представлен как процесс, протекающий в вязко-текучей среде, образованной СОТС и приконтактными слоями обрабатываемого материала и инструмента [44]. В этих условиях явление сдвига в твердых телах и распределении напряжений в потоке жидкости аналогичны.

Тогда допустимо выражение (1.3.3) подставить в формулу (1.3.6). В результате получим:

$$\partial y = \frac{\mu \cdot \partial v_c \cdot S \cdot \cos \nu \cdot \cos \theta}{P_z \cdot \cos(\lambda_i - \nu) \cdot \cos(\theta + \gamma_i)}. \quad (1.3.7)$$

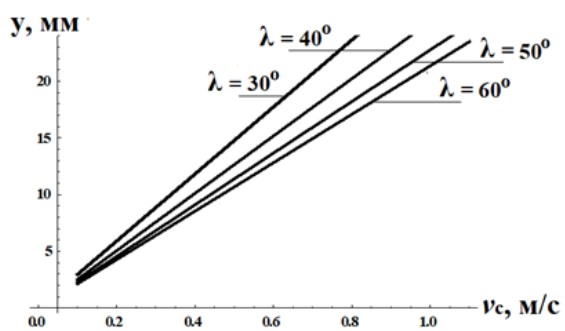
Для расчетов принимается $\mu = 1,787 \cdot 10^6$ Па·с, $S = 10 \cdot 10^{-6}$ м², скорость потока среды W приравнивается к скорости схода стружки v_c , которая в свою очередь определяется как отношение линейной скорости вращения фрезы к коэффициенту усадки стружки k , т.е. $W = v_c = v/k$ и тем самым учитывается деформация срезаемого слоя. Для

углеродистых конструкционных сталей принимается $k = 3 \div 5$. Если принять $\nu = 0,5 \div 3,5$ м/с, то $\nu_c = 0,15 \div 1,2$ м/с. Сила F принимается равной нормальной силе N .

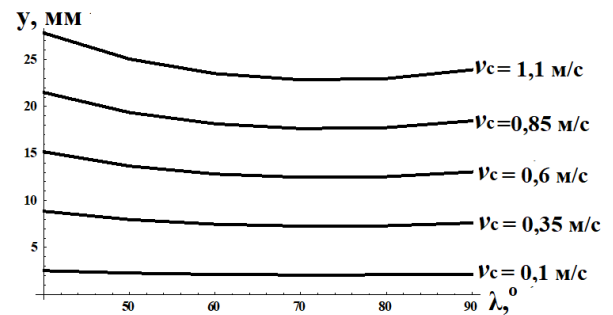
Результаты расчетов по формуле (1.3.7) представлены в таблице 1.3.3 и на рисунке 1.3.4.

Таблица 1.3.3. — Данные значений y при $\lambda_i = 30 \div 90^\circ = 30 \div 90^\circ$ и $\nu_c = 0,1 \div 1,1$ м/с

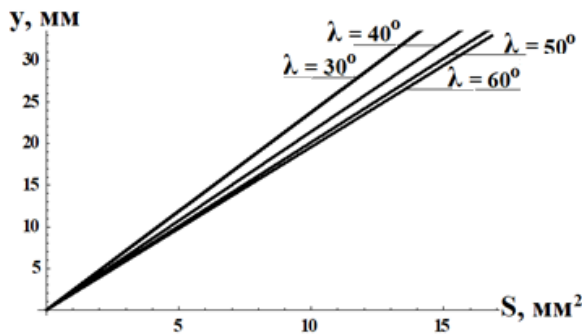
$\nu_c, \text{ м/с}$	$y, \text{ мм}$						
	$\lambda_i = 30^\circ$	$\lambda_i = 40^\circ$	$\lambda_i = 50^\circ$	$\lambda_i = 60^\circ$	$\lambda_i = 70^\circ$	$\lambda_i = 80^\circ$	$\lambda_i = 90^\circ$
0,1	2,96	2,53	2,28	2,14	2,08	2,09	2,17
0,35	10,35	8,85	7,97	7,48	7,27	7,31	7,61
0,6	17,74	15,17	13,66	12,82	12,46	12,53	13,04
0,85	25,13	21,49	19,36	18,16	17,66	17,76	18,48
1,1	32,52	27,82	25,05	23,5	22,85	22,98	23,91



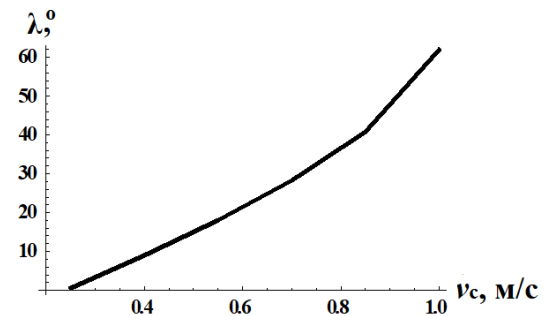
а)



б)



в)



г)

Рисунок 1.3.4. — Зависимости изменения координаты y от скорости стружки ν_c (а), площади S (б), угла λ_i (в) и угла λ_i от скорости стружки ν_c (г)

Как следует из графиков, с увеличением скорости схода стружки, ν_c (потока W) и площади поверхности режущей пластины (препятствия) S , а также уменьшения (силы сопротивления F) увеличение угла λ_i приводит к снижению координаты y и его влияние тем больше, чем больше скорость потока W . При этом установлен диапазон

изменений значений λ_i $50 \div 80^\circ$, при котором координата y принимает минимальные значения. Угол λ_i возрастает при увеличении скорости потока W . Характер данных зависимостей сопоставим с полученными для угла схода стружки η_{ci} (см. рис. 1.3.2,3) и тем самым подтверждает однонаправленность потоков СОТС и стружки.

Зависимости на рисунках 2 и 3 построены при отрицательных значениях λ_i и γ_i , для положительных значений λ_i и γ_i эти зависимости имеют аналогичный зеркально отраженный вид. Изменение координаты y зависит от заданных значений скорости W и силы F – увеличение линейной скорости W более 10 м/с и уменьшение силы до значения менее 300 Н приводит к росту координаты y до величины несоизмеримой с высотой режущей пластины (порядка 10 ÷ 30 мм) и размерами зоны резания (0,1 ÷ 5 мм). Из этого следует подтверждение установленного факта, что при высокоскоростном резании имеется возможность увеличения толщины a (подачи S_o) – $a = S_o \cdot \sin \varphi$ и ширины b (глубины t) резания – $b = t / \sin \varphi$ срезаемого слоя, что приведет к увеличению силы сопротивления и более эффективному использованию мощности привода станка, а также повышению производительности обработки.

С учетом результатов расчетов угла схода стружки и расположения режущей кромки в инструменте для проведения дальнейших лабораторных испытаний и выработки окончательных рекомендаций по рациональным геометрическим параметрам были изготовлены экспериментальные образцы торцовых фрез, представленные на рисунке 1.3.5.

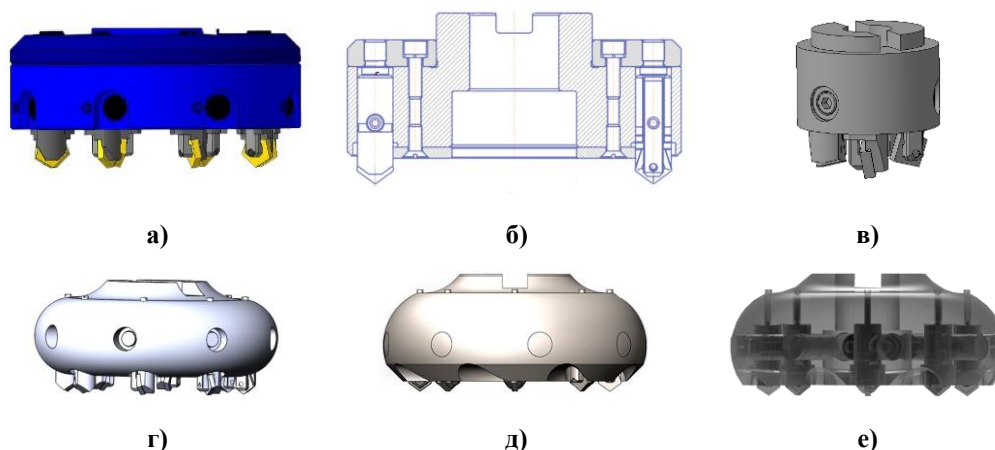


Рисунок 1.3.5. — Экспериментальные образцы: без стружкоотводящих канавок в форме диска (а и б); цилиндра (в), тора (г), со стружкоотводящими канавками (д и е)

В этих конструкциях предусмотрены различные формы корпусов, расположение и направление стружкоотводящих канавок на торце и периферии фрез с учетом вращения

фрез по часовой стрелке. В частности, в конструкциях на рис.5, а-г предусмотрен свободный сход стружки и подвод СОТС, определяемые только углом наклона режущей кромки лезвия, в конструкциях на рис. 5, д-е стружкоотводящие канавки выполнены на торцевой и периферийной поверхностях с рекомендованными значениями угла схода стружки η_{ci} .

Выводы. Таким образом, в результате математического моделирования процессов отвода стружки и потоков СОТС, установлены зависимости геометрических параметров режущих инструментов от механико-физических характеристик, режимов резания и аэро-гидродинамических процессов.

Исходя из полученных зависимостей предложен следующий алгоритм расчета направлений схода стружки и потоков смазочно-охлаждающей технологической среды (расположение стружко-потокоотводящих канавок):

1) исходя из заданных значений глубины резания, подачи и скорости резания определяются составляющие силы резания – главная P_z , радиальная P_y , осевая P_x , и их соотношения P_y/P_z , P_x/P_z ;

2) определяется нормальная сила N и угол наклона режущей кромки λ ;

3) определяется угол схода стружки η_c с учетом λ и N ;

4) рассчитывается скорость схода стружки v_c исходя из заданных значений скорости резания v и усадки стружки k ;

5) рассчитывается угол схода стружки η_c с учетом скорости схода стружки v_c и действующей силы N ;

6) рассчитываются значения изменений координаты δu , определяющие направление потока смазочно-охлаждающей технологической среды с учетом коэффициента вязкости среды μ , площади поверхности режущей пластины S , контактирующей с технологической средой, линейной скорости потока (схода стружки) и силы сопротивления среды F (нормальной силы N);

7) полученные значения η_c и δu выбираются в качестве оптимальных, определяющих расположение стружко-потокоотводящих канавок в корпусе блочно-модульной фрезы.

1.4 Механическая обработка плоских и криволинейных поверхностей деталей вращающимся режущим инструментом на токарных и фрезерных станках с ЧПУ

В связи с развитием металлорежущих станков с ЧПУ, позволяющих реализовывать трех-, четырех- и пяти осевую обработку с обеспечением требуемых значений мощности и скорости резания, увеличивается количество применяемых на практике кинематических схем резания, предложенных профессором Г.И. Грановским [10]. Реализованы такие виды обработки как винтовая интерполяция, трепанация, трохойдальной плунжерное резание, в которых реализуются сложные движения и траектории резания, например, винтовая и циклоида накрученные на окружность, трохоида и т.п.[14]. Зачастую в этих видах обработки рекомендуется использовать касательное движение (врезание по касательной) режущих лезвий, а также вращающийся режущий инструмент с крутоспиральными режущими кромками, как обеспечивающие плавное (безударное) резание. Эти предложения присутствуют в каталогах и рекламных материалах ведущих в области металлообработки зарубежных фирм, таких как «SandvikCoromant» (Швеция), «Seco» (Япония), «Hertel» (Германия), «Iscar» (Израиль), «TaeguTec» (Корея) и других. При этом не объясняется за счет каких физических и технологических аспектов обработки обеспечиваются преимущества применения касательного движения и крутоспиральных режущих инструментов. Вместе с тем физические явления, сопровождающие сложные виды обработки резанием, ранее исследовались и описывались ведущими отечественными учеными Г.И. Грановским, Ю.А. Новоселовым, В.В. Шварцем и др.

Согласно ГОСТу 25762 [45] касательное движение D_k – это прямолинейное поступательное или вращательное движение режущего инструмента, скорость которого меньше скорости главного движения резания и направлена по касательной к режущей кромке, предназначенное для того, чтобы сменять контактирующие с заготовкой участки режущей кромки. Профессор В.Ф. Бобров [30] трактует понятие касательного движения шире и рассматривает наружное продольное точение резцом с углом наклона режущей кромки равным 90° , когда режущая кромка касательна к обработанной поверхности, и продольное точение широким резцом с углом наклона режущей кромки не равным 0° и углом в плане равным 0° , когда режущая кромка перемещается вдоль самой себя. Он доказал, что увеличение угла λ при свободном резании уменьшает степень деформации стружки по длине, толщине и ширине. Если было бы возможно резание инструментом с углом λ_k равным 90° , то в этом случае размеры срезанной стружки были бы равны размерам срезаемого слоя. Однако это не означает, что зерна металла срезаемого слоя не будут деформироваться, т.к. относительный сдвиг и интенсивность деформаций с ростом

угла λ уменьшаются сравнительно мало, а в некоторых случаях остаются постоянными. Последнее происходит потому, что уменьшение нормального относительного сдвига компенсируется соответствующим увеличением относительного сдвига вдоль режущей кромки. При возрастании угла λ растут составляющие силы резания и боковая сила, т.к. возрастает рабочая длина режущей кромки. С увеличением угла λ увеличивается удельная работа резания и удельная работа трения на передней поверхности инструмента, а удельная работа деформации при этом уменьшается. Влияние увеличения угла λ на удельную работу и ее составляющие заметно только при $\lambda > 30-40^\circ$. При возрастании угла λ происходит уменьшение средней температуры стружки и увеличение износа режущей кромки. В дальнейших исследованиях процесса резания с принудительным перемещением режущей кромки вдоль самой себя отмечается [16], что указанный процесс соответствует процессу резания инструментом со статическим углом $\lambda \neq 0$ и постоянной рабочей длиной режущей кромки. Особенности процесса по сравнению с обычным резанием с прямолинейной кромкой состоят в том, что, во-первых, рабочий угол наклона режущей кромки создается кинематически и его величина определяется соотношением линейных скоростей вращения резца изготовления v_p/v , во-вторых, что в соприкосновении со срезаемым слоем за один оборот резца вступают все новые участки передней и задней поверхностей. Процессу присущи почти все закономерности резания, осуществляемого путем придания инструменту статического угла $\lambda_c \neq 0$. Исключением является более интенсивное уменьшение силы трения F , чем нормальной силы N при увеличении соотношений v_k/v (рабочего угла наклона кромки λ_k), приводящего не к увеличению среднего коэффициента трения, как это имеет место при традиционном резании, а к его уменьшению. Путь резания точки режущей кромки вращающегося резца уменьшается при возрастании угла λ , что увеличивает период стойкости инструмента.

В 70-80-е годы 19 столетия активизировалось применение ротационного резания, в котором реализуется касательное перемещение режущей кромки, и во многих исследованиях доказывались преимущества этого вида обработки по снижению трения, работы резания, температуры резания, шероховатости обработанной поверхности [46]. В частности, В.А. Землянский утверждал [47], что согласно вариационному принципу Остроградского-Гамильтона (принципу наименьшего действия), из всех возможных перемещений системы действительное перемещение между заданными точками будет соответствовать наименьшему действию. Применительно к обработке самовращающимся инструментом из всех возможных значений линейной скорости вращения при заданных условиях действительная скорость будет соответствовать наименьшей суммарной работе сил резания на режущих кромках резца и сил трения в его опорах. Следовательно,

самовращающийся резец сам должен за счет линейной скорости вращения выходить на режим минимальной затраты энергии, что соответствует наименьшим силам и температуре в зоне резания, а значит и наибольшей стойкости инструмента. Одновременно с этим при любой скорости вращения не равной нулю стойкость вращающегося резца должна быть большей, чем у обычного резца, из-за более эффективного охлаждения при непосредственном контакте рабочих участков режущих кромок с охлаждающей средой и увеличением длины активной части лезвия резца. При резании круглым резцом трение скольжения деформируемого материала по рабочим поверхностям заменяется частично трением качения в опорах вращающейся части резца. Это явление сопровождается уменьшением линейных скоростей, а значит, и соответствующим снижением работы поверхностного трения, что в свою очередь, влечет за собой снижение работы объемного деформирования благодаря меньшей интенсивности деформации. Уменьшение пластического деформирования срезаемого слоя и трения на поверхностях режущего лезвия инструмента за счет касательного перемещения режущей кромки приводит к снижению температуры резания. Так, И.С. Кушнер и В.В. Ледаев отмечали [48] немонотонное изменение температуры резания при увеличении соотношений скоростей вращения резца и заготовки. Причем точки минимальных значений температуры резания соответствуют соотношению линейных скоростей резца и детали в пределах 0,5...0,6, что соответствует углу наклона режущей кромки примерно 30°. Немонотонное изменение температуры резания при переменной скорости вращения резца, по-видимому, связано со следующими обстоятельствами: уменьшение количества выделяемой теплоты в результате снижения работы резания, происходящему при увеличении соотношений скоростей резца и детали (угла наклона режущей кромки), противодействует уменьшению отдачи теплоты в окружающую среду контактными поверхностями резца. Чем больше это соотношение, тем меньше время охлаждения поверхностей резца при холостом пробеге режущей кромки и более нагретыми выступают в резание его контактные поверхности. Действие обоих факторов приводит к образованию точки минимума на кривых зависимости температуры резания от соотношения линейных скоростей резца и детали.

Результаты этих исследований не были реализованы в полной мере в связи с отсутствием компактных приводов с «жесткими» и высокоскоростными характеристиками, быстродействующих программируемых систем и т.д. Необходимо отметить, что этим работам предшествовали разработки 40-х годов 19 столетия, включающих вращательные трубчатые резцы [49] использующих принцип В. Рейхеля [18], утверждавшего, что каждой паре обрабатываемого и инструментального материалов

соответствует оптимальная температура резания. Позднее профессор А.Д. Макаров подтвердил достоверность этого принципа [19] применительно к обработке нержавеющей сталей и жаропрочных сплавов. Т.е. с интервалом в 20-40 лет происходит возвращение к старым идеям, на качественно новом техническом уровне в связи с развитием «жесткого» и быстродействующего металлообрабатывающего оборудования.

В работе [17] были сопоставлены результаты исследований процесса резания с касательным перемещением режущей кромки в режимах самовращения и принудительного вращения инструмента, а также рассмотрены преимущества применения прерывистой режущей кромки. В частности, отмечена взаимосвязь таких характеристик процесса резания, как сила резания, усадка стружки, длина контакта, коэффициент трения и температура резания при изменении режима резания (соотношения линейной скорости вращающихся резца и детали, скорости детали, подачи на оборот и глубины резания) [50]. Установлен минимум значений температуры резания при определенных значениях соотношений линейных скоростей вращения резца и заготовки, что позволило предложить способ обработки с оптимизацией режимов резания [51], при котором корректировку скорости резания производят путем изменения одновременно линейной скорости вращения резца и заготовки при значениях соотношений скоростей вращения резца и заготовки от 0,2 до 0,6.

При механической обработке поверхностей деталей большое значение имеют величины деформации срезаемого слоя, совершаемой при этом работе и потребляемой мощности приводом станка. Особенно актуален учет этих величин при обработке на станках с ЧПУ, для которых характерен нестационарный процесс резания с изменяющимися во времени кинематическими и динамическими показателями. Как правило, современные станки с ЧПУ позволяют фиксировать мощность в процессе резания и корректировать элементы режима резания. Дополнительные возможности по управлению процессом резания обеспечивает применение режущих инструментов с крутонаклонной режущей кромкой [30]. Влияние изменения угла наклона режущей кромки за счет кинематических особенностей обработки плоских и криволинейных поверхностей вращающейся детали вращающимся инструментом (фрезы) на деформационные характеристики процесса резания в настоящее время изучены недостаточно. Результаты рассмотренных исследований были положены в основу совершенствования и развития обработки поверхностей деталей в виде тел вращения вращающимся инструментом, реализуемой на современных трех- и пятиосевых станках с ЧПУ.

Для определения влияния угла наклона режущей кромки инструмента и ее касательного движения резания на параметры (скорость резания, подача) и характеристики (сила резания, усадка стружки) процесса резания рассмотрим некоторые

схемы обработки конструктивных элементов и поверхностей вращающейся детали вращающимся инструментом.

На рисунке 1.4.1 представлена схема обработки плоской поверхности детали на токарно-фрезерном станке с ЧПУ. Обработка плоской поверхности может осуществляться как при попутном (рисунок 1.4.1, а), так и при встречном фрезеровании (рисунок 1.4.1, б).

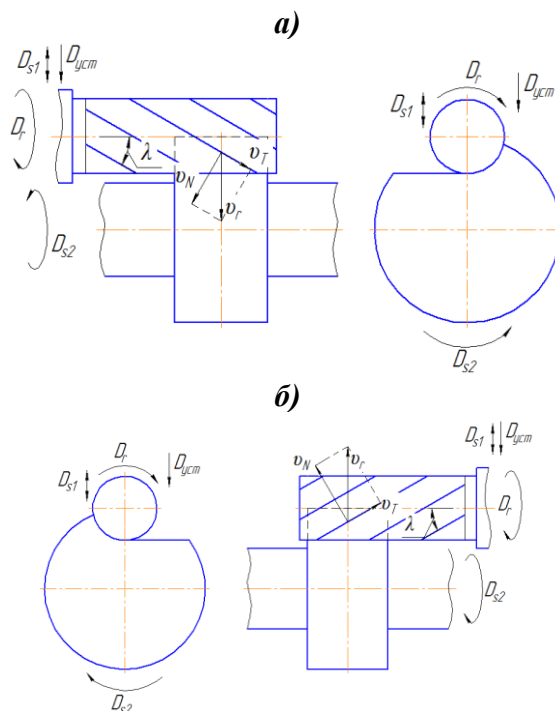


Рисунок 1.4.1. – Схемы обработки плоской поверхности детали при попутном (а) и встречном (б) фрезеровании

Вращательное движение инструмента D_f совпадает по направлению с движением подачи заготовки D_{s2} , (при попутном фрезеровании) или разнонаправлены (при встречном фрезеровании), которые в сочетании с движением подачи инструмента D_{s1} позволяют получать плоскую поверхность детали. На данных схемах видно, что нормальная линейная скорость резания v_N , направленная перпендикулярно к режущей кромке инструмента в сочетании с касательной линейной скоростью резания v_T образуют линейную скорость резания инструмента v_r . Независимо от угла наклона режущей кромки λ скорость резания инструмента v_r будет перпендикулярна в любой точке режущей кромки к оси вращения инструмента. Но, учитывая скорости движения подачи инструмента v_{s1} и заготовки v_{s2} , результирующая скорость резания при попутном и встречном фрезеровании в различных точках соприкосновения режущего лезвия инструмента с обрабатываемой поверхностью заготовки будет разной.

Как при попутном, так и при встречном фрезеровании скорость движения подачи инструмента v_{s1} от точки начала врезания в заготовку до точки пересечения с осью детали

имеет одно направление, а затем оно меняется на противоположное (рисунок 1.4.2 и 1.4.3). Данное изменение направлений скорости движения подачи инструмента v_{s1} влияет на общее направление результирующей скорости резания. Направление результирующей линейной скорости обработки $v \uparrow$ и $v \downarrow$, будет зависеть от направления суммарной скорости подачи v_{s1} и v_{s2} , которая включает скорости движения подачи инструмента v_{s1} и заготовки v_{s2} в рассматриваемой точке.

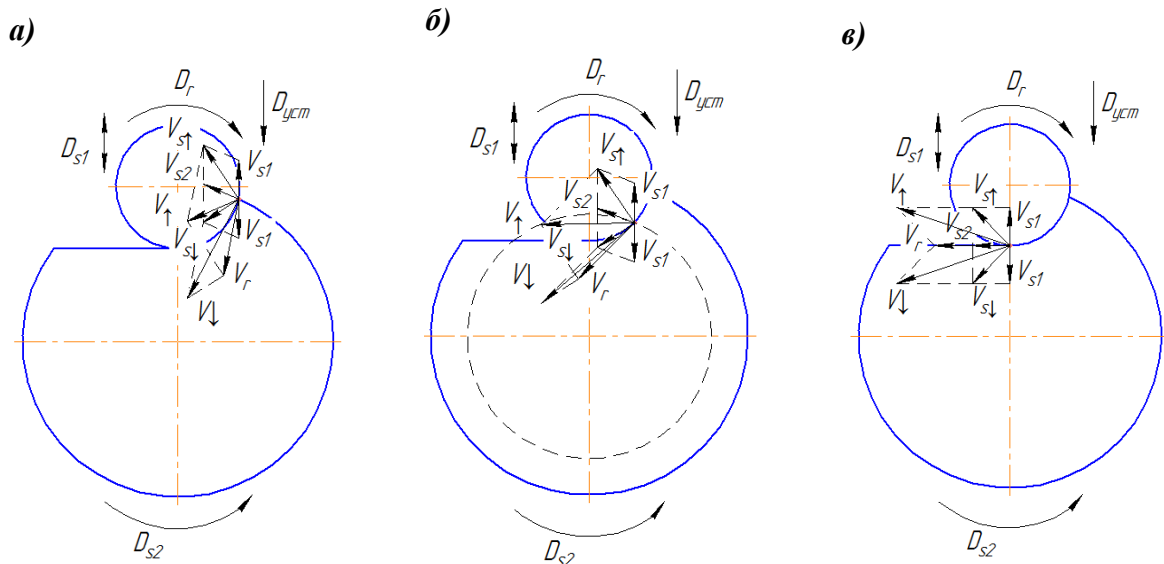


Рисунок 1.4.2. - Направления линейных скоростей резания при попутном фрезеровании плоской поверхности: а) в точке врезания инструмента в заготовку, б) в середине участка обработки, в) в точке выхода инструмента из заготовки

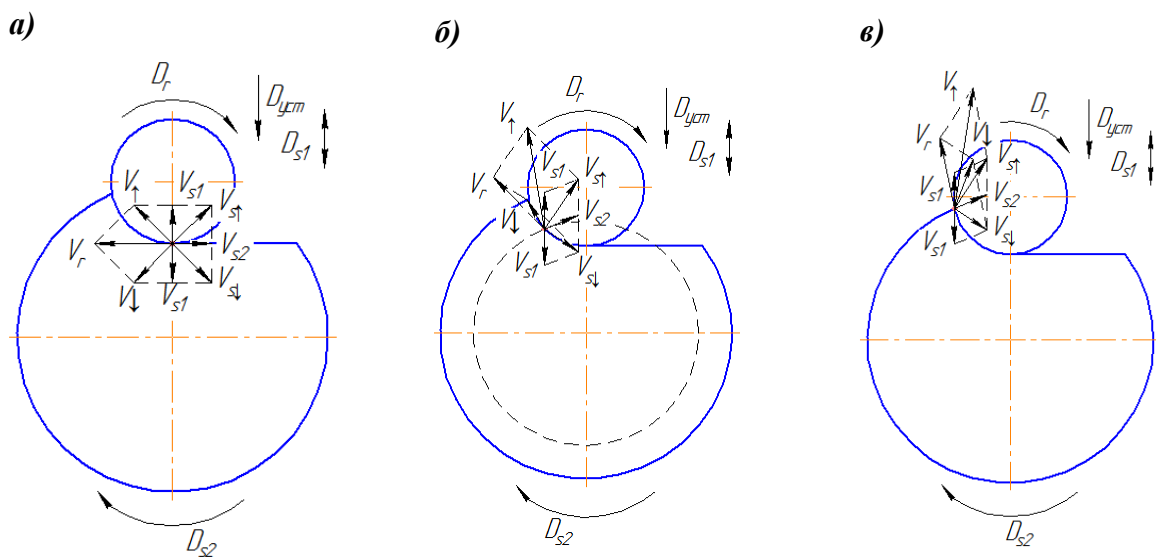


Рисунок 1.4.3. - Направления линейных скоростей резания при встречном фрезеровании плоской поверхности: а) в точке врезания инструмента в заготовку, б) в середине участка обработки, в) в точке выхода инструмента из заготовки

Из рисунков 1.4.2 и 1.4.3 видно, что при попутном и встречном фрезеровании наблюдается угловое расхождение между результирующими скоростями обработки v_{\uparrow} и v_{\downarrow} . Величина расхождения между результирующими векторами будет зависеть не только от скорости движения подачи инструмента v_{S1} , но и от разнонаправленности скорости резания инструмента v_r со скоростью подачи заготовки v_{S2} в рассматриваемой точке (при попутном фрезеровании скорость v_r и скорость заготовки v_{S2} в рассматриваемой точке направлены в одну сторону: при встречном – разнонаправлены).

Для определения величины результирующего вектора \bar{v}_{\uparrow} или \bar{v}_{\downarrow} воспользуемся теоремами косинусов и синусов. Расчетная схема нахождения результирующих скоростей представлена на рисунке 1.4.4.

При обработке плоскости вращающимся инструментом с радиусом R_1 цилиндрической заготовки с радиусом R_2 векторы линейных скоростей в любой точке обрабатываемого участка, которая расположена под некоторым углом ρ относительно центра инструмента определяются путем нахождения контактного радиуса заготовки R_2' .

Этот радиус находится как $R_2' = \sqrt{a_w^2 + R_1^2 - 2 \cdot a_w \cdot R_1 \cdot \cos \rho}$. Зная этот радиус можно найти угол, под которым наклонен искомый радиус. Он находится следующим образом:

$$\frac{R_2'}{\sin \rho} = \frac{R_1}{\sin \sigma} \quad \sigma = \arcsin \frac{R_1 \cdot \sin \rho}{R_2'}$$

Зная этот угол и направление подачи можно определить направление вектора линейной подачи в рассматриваемой точке относительно центра заготовки, который расположен перпендикулярно к радиусу контактной окружности заготовки R_2' в рассматриваемой точке. Согласно правилу нахождения скалярного произведения, находим результирующий вектор подачи $v_{S\uparrow}$ или $v_{S\downarrow}$, направление которого зависит от направления

подачи инструмента v_{S1} в рассматриваемой точке: $v_{S\uparrow}(v_{S\downarrow}) = v_{S1} \cdot v_{S2} \cdot \cos v_{S1} v_{S2}$. Отсюда,

зная направление скорости резания инструмента v_r , линейный вектор которой расположен перпендикулярно к радиусу окружности инструмента R_1 в рассматриваемой точке, можно

найти результирующие векторы линейных скоростей обработки \bar{v}_{\uparrow} и \bar{v}_{\downarrow} :

$$v_{\uparrow}(v_{\downarrow}) = v_r \cdot v_{S\uparrow}(v_{S\downarrow}) \cdot \cos v_r v_{S\uparrow}(v_{S\downarrow})$$

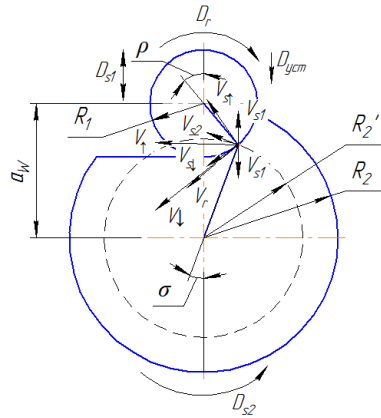


Рисунок 1.4.4. – Схема для определения результирующих линейных скоростей

Как известно, угол наклона режущей кромки λ рассматривается в инструментальной, статической и кинематической системах координат. В инструментальной системе координат угол λ_r , по сути, угол заточки режущей кромки инструмента, рассматриваемого как геометрическое тело (вне процесса резания). Этот угол определяется между режущей кромкой и отсчетной осью или поверхностью инструмента. Например, для концевой фрезы угол λ_r – это угол между режущей кромкой и геометрической осью (осью симметрии) (рисунок 1.4.5).

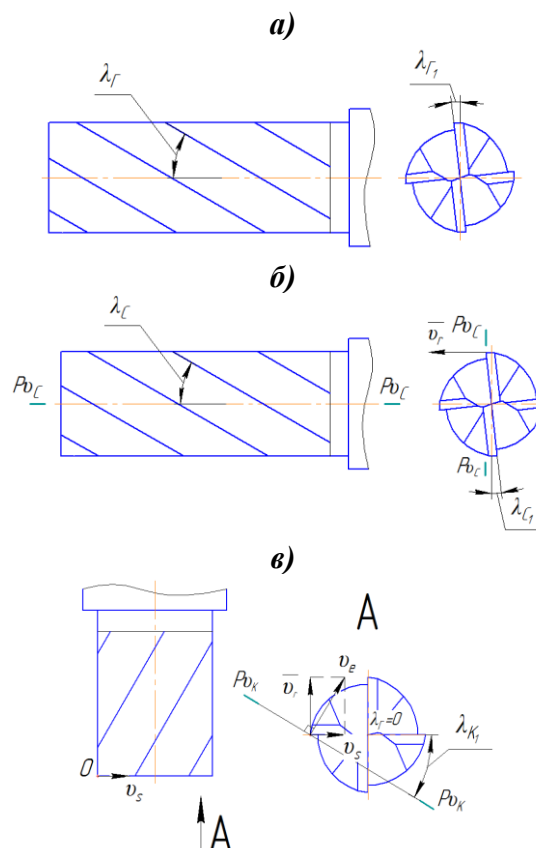


Рисунок 1.4.5. – Схема для определения угла наклона режущей кромки инструмента в инструментальной (а), статической (б) и кинематической (в) системах координат

Угол λ_c в статической системе координат – это угол установки инструмента на станке только при главном движении резания. В этом случае за отсчетную плоскость принимается основная плоскость, перпендикулярная вектору линейной скорости главного движения. Например, для концевой фрезы λ_c – это угол в статической плоскости резания между режущей кромкой и основной плоскостью $P_{vc}-P_{vc}$.

В кинематической системе координат учитываются все элементарные движения резания и отсчетную основную плоскость проводят перпендикулярно вектору скорости резания (результатирующему). Например, для концевой фрезы угол λ_k – это угол между режущей кромкой и кинематической основной плоскостью $P_{vk}-P_{vk}$.

При обработке плоской поверхности вращающейся детали вращающимся инструментом (рисунок 1.4.6, а) возможные варианты расположения режущей кромки на цилиндрической и торцовой поверхностях фрезы представлены на рисунках 1.4.6, б и 1.4.6, в.

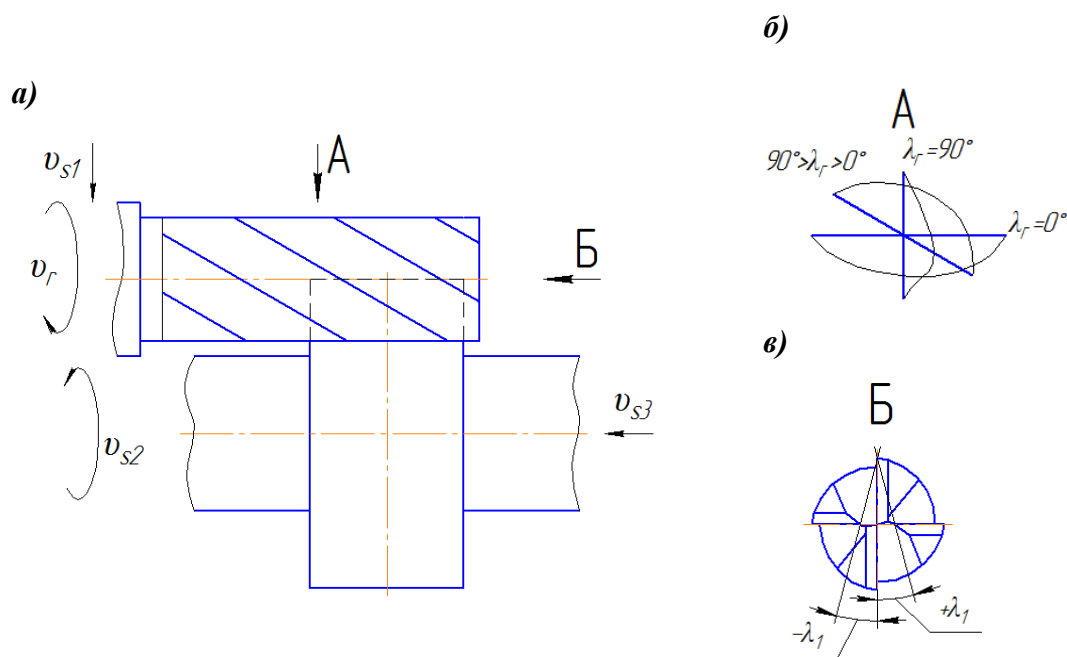


Рисунок 1.4.6. – Схема обработки плоской поверхности вращающейся детали вращающимся инструментом (а) и возможные углы наклона режущей кромки на цилиндрической (б) и торцовой (в) поверхностях концевой фрезы

Если $\lambda_r = 0^\circ$ (рисунок 1.4.6, в), то режущая кромка инструмента контактирует по максимальной ширине b , что приводит к росту сил и мощности резания. При $0^\circ < \lambda_r \leq 90^\circ$ резание возможно при подаче инструмента v_{s3} вдоль оси главного вращательного движения. В этом случае реализуется ротационное и плунжерное резание, для которых характерно снижение мощности резания за счет касательного движения.

При касательном движении важно соотношение линейных скоростей вращения инструмента и заготовки (передаточное отношение i_k). Если реализуется кинематическая

схема резания точения, то $\frac{v_{II}}{v_3} \leq 1$ и оптимальным считается значение кинематического коэффициента $i_k = 0,5 \dots 0,6$, что соответствует изменению $60^\circ > \lambda_K > 30^\circ$. Если реализуется

кинематическая схема фрезерования, то $\frac{v_3}{v_{II}} < 1$ и в этом случае $i_k = 0,01 \dots 0,1$, то есть влияние изменения направления вектора линейной скорости заготовки на положение основной плоскости незначительно и им можно пренебречь.

При фрезеровании существенным является влияние изменения λ_C или угла установки осей вращения инструмента и заготовки на процесс резания, который для разных кинематических схем резания может принимать различные значения (рисунок 1.4.7).

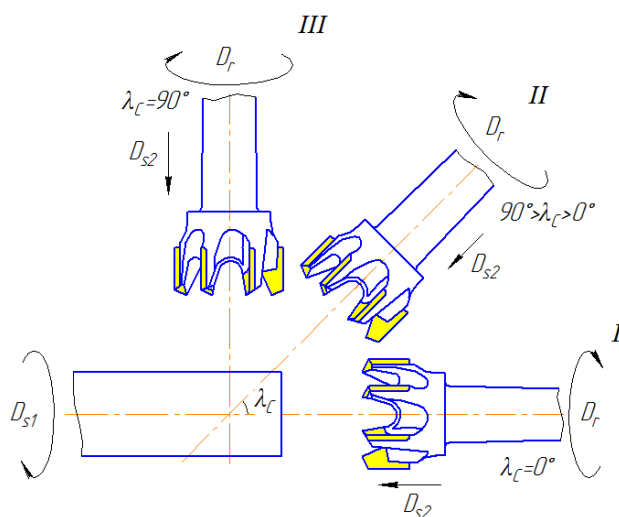


Рисунок 1.4.7. – Схемы установки вращающегося инструмента относительно вращающейся детали

Например, при обработке цилиндрической или конической поверхностей детали фреза и деталь соосны и $\lambda_C = 0^\circ$ (положение I фрезы на рисунке 1.4.7). При обработке неполной сферической поверхности детали оси вращения детали и фрезы наклонены относительно друг друга под углом $90^\circ \geq \lambda_C > 0^\circ$ (положение II и III фрезы на рисунке 1.4.7).

Рассмотрим процесс превращения срезаемого слоя в стружку при резании инструментом с углом $\lambda \neq 0$, при котором каждая точка режущей кромки работает с одинаковым по величине и направлению вектором истинной скорости резания, одинаковой толщиной срезаемого слоя и постоянной величиной кинематического угла наклона главной режущей кромки [30] применительно к схеме резания, представленной на рисунке 1.4.8 [54].

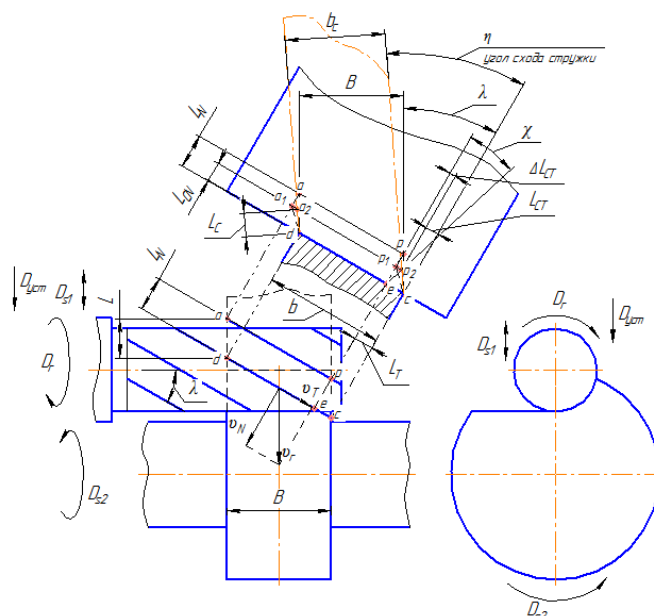


Рисунок 1.4.8. – Схема образования стружки при резании инструментом с углом $\lambda \neq 0$

Если считать, что обрабатываемый материал абсолютно недеформируем, то при перемещении инструмента из положения ap в положение cd на расстояние L развернутая на передней поверхности контактная поверхность срезанной стружки представляет собой параллелограмм $apcd$ с основанием, равным рабочей длине режущей кромки b , и высотой, равной расстоянию по нормали L_N между положениями режущей кромки. Боковые стороны параллелограмма, определяющие направление схода стружки по передней поверхности инструмента, составляют с нормалью к режущей кромке угол, равный углу наклона главной режущей кромки λ .

При резании реального материала, в результате деформирования срезаемого слоя, развернутая на передней поверхности контактная поверхность срезанной стружки в первом приближении представляет параллелограмм a_2p_2cd с основанием, равным рабочей длине режущей кромки, и высотой L_{CN} меньшей, чем расстояние по нормали L_N . Стороны этого параллелограмма образуют с перпендикуляром к режущей кромке угол η , в общем случае не равный углу λ .

Как показал А.А. Брикс [55], превращение параллелограмма $apcd$ в параллелограмм a_2p_2cd может быть объяснено следующим образом. Движение любой точки наклонной режущей кромки в направлении вектора скорости резания \bar{v}_T может быть представлено состоящим из двух движений: одного в направлении, нормальном к режущей кромке, определяемого вектором \bar{v}_N , и в другом направлении, параллельном режущей кромке, определяемого вектором \bar{v}_T .

При перемещении в направлении, нормальном к режущей кромке на расстояние L , отдельные слои металла толщиной Δx , деформируясь по плоскости сдвига в направлении перпендикулярном к режущей кромке, вызовут укорочение срезаемого слоя до размера L_{CN} . При перемещении вдоль режущей кромки на расстояние L_T слои образовавшейся стружки, параллельные режущей кромке, увлекаемые передней поверхностью инструмента, сдвинутся вдоль режущей кромки так, что верхний край стружки переместится на расстояние ΔL_{CT} .

Сдвиг слоев стружки вдоль режущей кромки легко подтверждается следующим. Если на верхней плоскости срезаемого слоя нанести риску ep , перпендикулярную к режущей кромке инструмента, то на срезанной стружке эта риска займет положение ep_2 , отклонившись от перпендикуляра к режущей кромке в направлении вектора скорости \vec{v} на угол χ .

В результате одновременного суммарного воздействия на срезаемый слой двух перемещений срезанная стружка будет характеризоваться следующими размерами: нормальной длиной L_{CN} , толщиной a_c , шириной b_c и углом схода стружки η по передней поверхности. Степень конечного формоизменения срезаемого слоя, превратившегося в стружку, можно оценить соответствующими коэффициентами деформаций: степень деформации стружки в направлении, перпендикулярном к режущей кромке - коэффициентом нормального укорочения K_{IN} , степень деформации в направлении, перпендикулярном к контактной поверхности стружки - коэффициентом утолщения K_a , степень деформации в направлении, перпендикулярном к боковой стороне стружки - коэффициентом уширения K_b .

Из рисунка 8 следует, что коэффициент нормального укорочения стружки равен:

$$K_{IN} = \frac{L_N}{L_{cN}} \quad (1.4.1)$$

Из рисунка 1.4.1 также следует:

$$L = \frac{L_N}{\cos \lambda},$$

$$L_c = \frac{L_{cN}}{\cos \eta}.$$

Тогда

$$K_l = \frac{L}{L_c} = \frac{L_N}{L_{cN}} \cdot \frac{\cos \eta}{\cos \lambda} \quad \text{или} \quad K_l = K_{IN} \cdot \frac{\cos \eta}{\cos \lambda} \quad (1.4.2)$$

Коэффициент утолщения стружки:

$$K_a = \frac{a_c}{a} \quad (1.4.3)$$

Коэффициент уширения стружки:

$$K_b = \frac{b_c}{B} \quad (1.4.4)$$

где B – расстояние по нормали между боковыми сторонами идеальной недеформированной стружки, равное ширине срезаемого слоя.

Коэффициент уширения стружки может быть выражен через угол наклона режущей кромки и угол схода стружки:

$$b_c = K \cdot b \cdot \cos \eta,$$

где K – коэффициент уширения стружки вдоль режущей кромки, больший единицы.

Т.к. $b = \frac{B}{\cos \lambda}$, то $b_c = K \cdot B \cdot \frac{\cos \eta}{\cos \lambda}$. Отсюда

$$K_b = K \frac{\cos \eta}{\cos \lambda} \quad (1.4.5)$$

Если в уравнении (1.4.5) принять $K=1$, то получим известную формулу М.Е. Мерчента [53].

Согласно методике определения нормальной силы N , силы трения F и ее составляющих F_N и F_T [30], рассмотрим схему обработки на рисунке 1.4.9, где N – нормальная сила, F_N – нормальная сила трения (проекция полной силы трения на нормальную плоскость); F_T – касательная сила трения; P_z' – часть главной составляющей силы резания P_z ; F_{1z} – сила трения, действующая на поверхности резания вдоль оси Z в сторону, обратную рабочему движению инструмента.

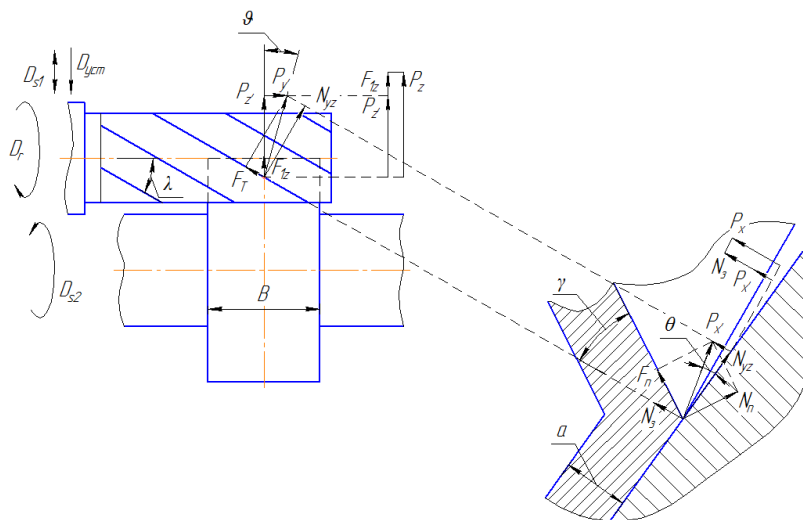


Рисунок 1.4.9. – Схема для определения нормальной силы и сил трения на передней поверхности инструмента с углом $\lambda \neq 0$

Часть главной составляющей силы резания P_Z :

$$P'_Z = P_Z - F_{1Z} . \quad (1.4.6)$$

Часть силы подачи P_X :

$$P'_X = P_X - N_1 . \quad (1.4.7)$$

Вспомогательный угол ϑ :

$$tg \vartheta = \frac{P_Y}{P'_Z} . \quad (1.4.8)$$

Нормальная к режущей кромки сила N_{YZ} , действующая вдоль поверхности резания:

$$N_{YZ} = P'_Z \frac{\cos(\lambda - \vartheta)}{\cos \vartheta} . \quad (1.4.9)$$

Вспомогательный угол θ :

$$tg \theta = \frac{P'_X}{N_{YZ}} . \quad (1.4.10)$$

Нормальная к передней поверхности силы N :

$$N = \frac{N_{YZ}}{\cos \theta} \cos(\theta + \gamma) . \quad (1.4.11)$$

Нормальная сила трения F_N :

$$F_N = \frac{N_{YZ}}{\cos \theta} \sin(\theta + \gamma) . \quad (1.4.12)$$

Касательная сила трения F_T :

$$F_T = P'_Z \frac{\sin(\lambda - \vartheta)}{\cos \vartheta} . \quad (1.4.13)$$

Угол между нормальной и полной силой трения η :

$$tg \eta = \frac{F_T}{F_N} . \quad (1.4.14)$$

Полная сила трения F :

$$F = \frac{F_N}{\cos \eta} . \quad (1.4.15)$$

Средний коэффициент трения μ :

$$\mu = \frac{F}{N} . \quad (1.4.16)$$

Минутная работа резания достаточно точно определяется уравнением:

$$E = E_d + E_{T.n} + E_{T.z} . \quad (1.4.17)$$

где E_d – минутная работа деформации;

$E_{T.n}$ – минутная работа трения на передней поверхности;

$E_{T.z}$ – минутная работа трения на задней поверхности.

Удельная работа резания: $e = e_d + e_{T.n} + e_{T.z}$

Удельная работа резания и каждая ее составляющая находятся делением минутной работы на минутный объем срезаемого слоя, равный произведению aBv (рисунок 1.4.10).

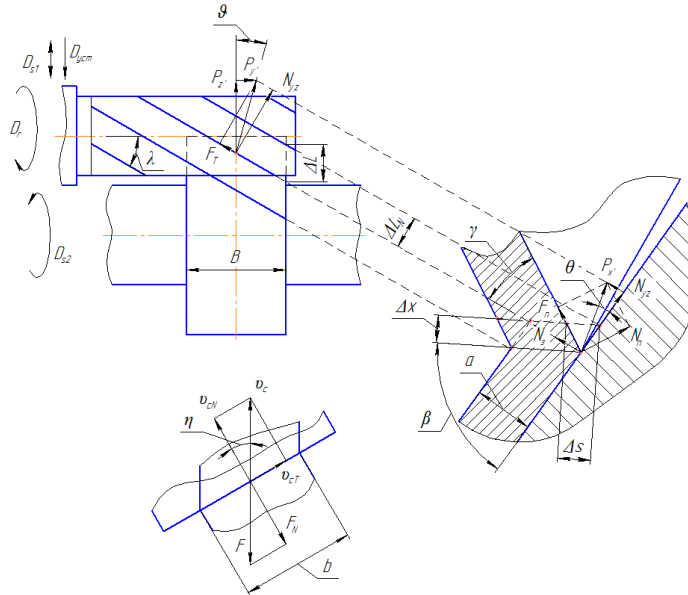


Рисунок 1.4.10. – Схема для определения составляющих работы резания инструментом с углом $\lambda \neq 0$

Работа деформации состоит из двух частей:

E_{dN} – работа, соответствующая перемещению инструмента в направлении, перпендикулярном к режущей кромки;

E_{dT} – работа, соответствующая перемещению инструмента вдоль режущей кромки.

Δx – толщина материала по плоскости сдвига

Работа простого сдвига под углом β , в направлении перпендикулярном к режущей кромки:

$$E'_{dN} = P_{\tau} \cdot \Delta s \quad (1.4.18)$$

где P_{τ} – сила сдвига;

Δs – величина сдвига на плоскости сдвига, соответствующая перемещению режущей кромки инструмента на расстояние ΔL_N .

Величина сдвига:

$$\Delta s = \Delta L_N \frac{\cos \gamma}{\cos(\beta - \gamma)} = \Delta L \frac{\cos \lambda \cdot \cos \gamma}{\cos(\beta - \gamma)} .$$

Тогда

$$E'_{\partial N} = P_{\tau} \cdot \Delta L \frac{\cos \lambda \cdot \cos \gamma}{\cos(\beta - \gamma)} . \quad (1.4.19)$$

Минутная работа деформации:

$$E_{\partial N} = P_{\tau} \cdot v \frac{\cos \lambda \cdot \cos \gamma}{\cos(\beta - \gamma)} , \quad (1.4.20)$$

$$\text{где } P_{\tau} = P'_Z \frac{\cos(\lambda - \vartheta) \cdot \cos(\beta + \theta)}{\cos \vartheta \cdot \cos \theta} ,$$

$$\operatorname{tg} \vartheta = \frac{P'_Y}{P'_Z} ,$$

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{P'_X}{P'_Z} \cdot \frac{\cos \vartheta}{\cos(\lambda - \vartheta)} .$$

Окончательно получаем:

$$E_{\partial N} = P'_Z \cdot v \frac{\cos(\lambda - \vartheta) \cdot \cos(\beta + \theta) \cdot \cos \lambda \cdot \cos \gamma}{\cos(\beta - \gamma) \cdot \cos \vartheta \cdot \cos \theta} . \quad (1.4.21)$$

Работа простого сдвига вдоль режущей кромки:

$$E'_{\partial T} = P_T \cdot \Delta T_c , \quad 1.4. (22)$$

где ΔT_c – сдвиг стружки вдоль режущей кромки, соответствующий перемещению инструмента на расстояние ΔL_N .

$$\Delta T_c = \Delta L_N \cdot \operatorname{tg} \lambda - \Delta L_{CN} \cdot \operatorname{tg} \eta ,$$

где ΔL_{CN} – длина стружки, соответствующая перемещению инструмента на расстояние ΔL_N .

$$\Delta L_{CN} = \Delta L_N \cdot \frac{\sin \beta}{\cos(\beta - \gamma)} = \Delta L \cdot \frac{\cos \lambda}{K_{IN}} ,$$

$$\Delta L_{CN} = \frac{\Delta L}{K_I} \cdot \cos \eta .$$

Окончательно

$$\Delta T_c = \Delta L \cdot \left(\sin \lambda - \frac{\sin \eta}{K_I} \right) . \quad (1.4.23)$$

Минутная работа деформации:

$$E_{\partial T} = P'_Z \cdot v \cdot \frac{\sin(\lambda - \vartheta)}{\cos \vartheta} \cdot \left(\sin \lambda - \frac{\sin \eta}{K_I} \right) . \quad (1.4.24)$$

Суммарная минутная работа деформации:

$$E_{\partial} = P'_Z \cdot v \cdot \left[\frac{\cos(\lambda - \vartheta) \cdot \cos(\beta + \theta) \cdot \cos \lambda \cdot \cos \gamma}{\cos(\beta - \gamma) \cdot \cos \vartheta \cdot \cos \theta} + \frac{\sin(\lambda - \vartheta)}{\cos \vartheta} \cdot \left(\sin \lambda - \frac{\sin \eta}{K_I} \right) \right] \cdot \frac{\kappa \Gamma M}{\text{мин}} . \quad (1.4.25)$$

Удельная работа деформации:

$$e_{\delta} = \frac{P'_z}{aB} \cdot \left[\frac{\cos(\lambda - \vartheta) \cdot \cos(\beta + \theta) \cdot \cos \lambda \cdot \cos \gamma}{\cos(\beta - \gamma) \cdot \cos \vartheta \cdot \cos \theta} + \frac{\sin(\lambda - \vartheta)}{\cos \vartheta} \cdot \left(\sin \lambda - \frac{\sin \eta}{K_l} \right) \right] \cdot 10^{-3}, \frac{\text{кГм}}{\text{мм} \cdot \text{мин}} \quad (1.4.26)$$

Работа трения на передней поверхности

$$E_{T.n} = F \cdot v_c \quad (1.4.27)$$

Сила трения:

$$F = \frac{F_N}{\cos \eta}, \quad (1.4.28)$$

$$\text{где } F_N = P'_z \cdot \frac{\cos(\lambda - \vartheta) \cdot \sin(\theta + \gamma)}{\cos \vartheta \cdot \cos \theta} \quad (1.4.29)$$

Скорость движения стружки:

$$v_c = \frac{v}{K_l} \quad (1.4.30)$$

Минутная работа на передней поверхности:

$$E_{T.n} = P'_z \cdot v \cdot \frac{\cos(\lambda - \vartheta) \cdot \sin(\theta + \gamma)}{K_l \cdot \cos \vartheta \cdot \cos \theta \cdot \cos \eta}, \frac{\text{кГм}}{\text{мин}} \quad (1.4.31)$$

Удельная работа трения на передней поверхности:

$$e_{T.n} = \frac{P'_z}{aB} \cdot \frac{\cos(\lambda - \vartheta) \cdot \sin(\theta + \gamma)}{K_l \cdot \cos \vartheta \cdot \cos \theta \cdot \cos \eta} \cdot 10^{-3}, \frac{\text{кГм}}{\text{мм} \cdot \text{мин}} \quad (1.4.32)$$

Минутная работа на задней поверхности:

$$E_{T.z} = E - (E_{\delta} + E_{T.n}) \quad (1.4.33)$$

Удельная работа трения на задней поверхности:

$$e_{T.z} = e - (e_{\delta} + e_{T.n}) \cdot 10^{-3} \text{кГм/мм}^3 \quad (1.4.34)$$

Определим величины характеристик процесса резания, входящих в формулы (6)-(34), для рассматриваемого случая обработки лыски (плоской поверхности) вращающейся детали вращающимся инструментом (концевой фрезой). Ширина обрабатываемой поверхности составляет 20 мм, глубина резания – 3 мм. Весь припуск снимается за один проход. Материалом заготовки служит конструкционная сталь $\sigma_B=600$ МПа. В качестве режущего инструмента используется 4-х зубая твердосплавная концевая фреза диаметром 16 мм, скорость резания принимается равной 100 м/мин. Зная исходные данные об обрабатываемом материале и режущем инструменте, рассчитывается главная составляющая силы резания P_z по общепринятой формуле $P_z = C_{pz} \cdot t^{x_{pz}} \cdot s^{y_{pz}} \cdot v^{z_{pz}} \cdot K_{pz}$ [52]. При определении влияния угла наклона режущей кромки λ на процесс резания

принимается следующее соотношение составляющих силы резания: $P_x=0,3 \cdot P_z$ и $P_y=0,5 \cdot P_z$; $P_x=0$ и $P_y=0$.

Результаты расчетов представлены в виде фрагментов графиков на рисунках 1.4.11 и 1.4.12.

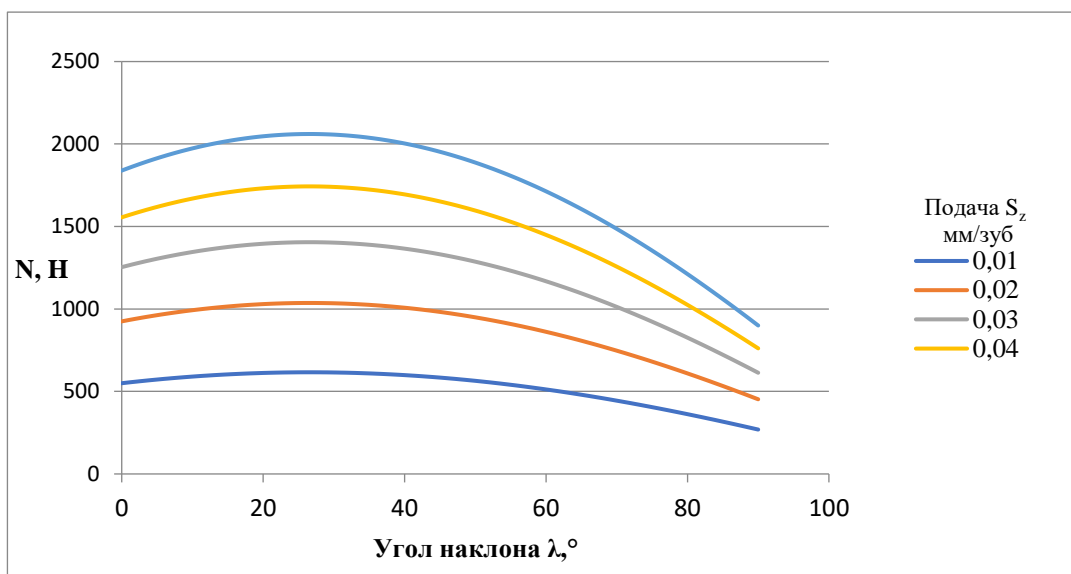


Рисунок 1.4.11. – Влияние угла наклона режущей кромки λ на нормальную силу резания при соотношении составляющих силы резания $P_x=0,3 \cdot P_z$ и $P_y=0,5 \cdot P_z$

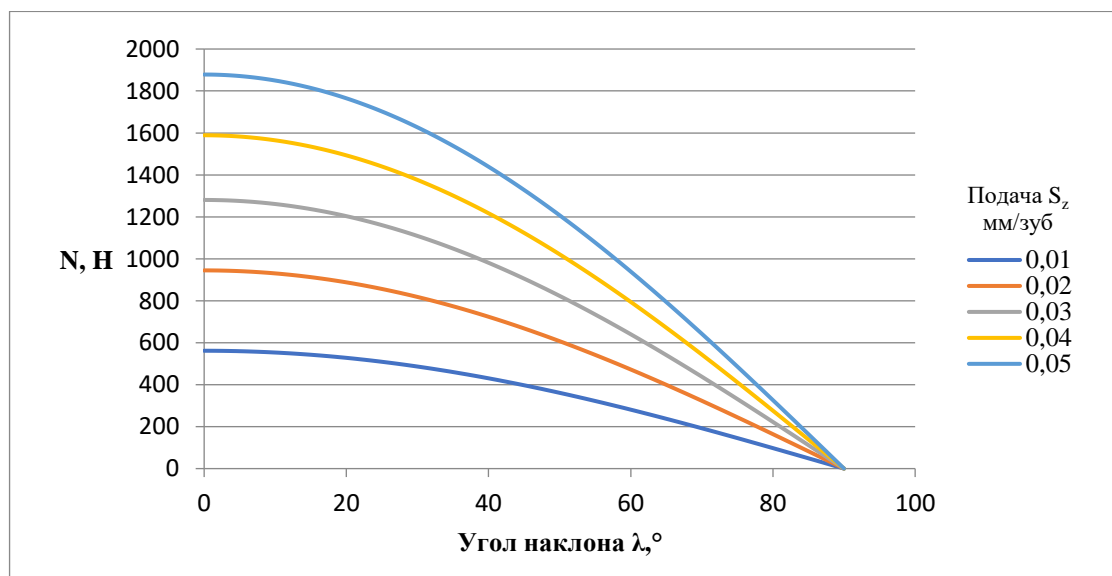


Рисунок 1.4.12. – Влияние угла наклона режущей кромки λ на нормальную силу резания при соотношении составляющих силы резания $P_x=0$ и $P_y=0$

Если учитываются все три составляющие силы резания P_x, P_y и P_z , то согласно формуле (8) изменяется положение результирующего вектора силы резания относительно режущей кромки инструмента. Это приводит к изменению угла ϑ . В свою очередь, угол ϑ ,

входящий в формулу (9), влияет на значение угла λ , уменьшая или увеличивая его значения. Это изменение λ в зависимости от заданных условий резания (в нашем случае $\lambda = 0 \dots 27^\circ$) приводит к некоторому снижению нормальной силы N (рисунок 1.4.11). Если учитывается только тангенциальная составляющая силы резания P_z , которая имеет наибольшее значение по сравнению со значениями P_x и P_y , то при $\lambda = 0^\circ$ нормальная сила N имеет максимальное значение и по мере увеличения значения λ (от 0° до 90°) значения N уменьшаются до 0 (рисунок 1.4.12).

Аналогичным образом анализируется влияние угла наклона режущей кромки на нормальную силу N по формуле (11), на нормальную и касательную силы трения по формулам (12) и (13) с учетом углов θ (формула (10)) и η (формула (14)), а также на работу деформации, сдвига и трения.

Выводы. Кинематический анализ различных схем обработки плоских, цилиндрических, сферических, винтовых (резьбовых) поверхностей деталей показывает, что им присуще движение режущей кромки по касательной к поверхности резания или обрабатываемой поверхности детали, характеризующиеся соответствующими направлением и величиной линейной скорости резания. При этом возможно изменение значений геометрического угла наклона режущей кромки вращающегося инструмента в пределах от 0° до 90° за счет угла установки оси вращения детали или инструмента и положения основной плоскости в кинематической системе координат. Наличие касательного движения и трансформация угла наклона режущей кромки приводят к существенным изменениям физических характеристик процесса резания.

Выведенные формулы для расчета механических характеристик процесса резания позволяют учитывать зависимость силы резания от угла наклона режущей кромки для различных условий обработки – с увеличением угла наклона режущей кромки инструмента сила резания уменьшается. С учетом радиальной и осевой составляющих силы резания значения нормальной силы резания при малых значениях угла наклона режущей кромки ($\lambda < 30^\circ$) несколько снижается. При больших значениях λ рекомендуется реализовывать кинематические схемы плунжерного фрезерования, ротационного резания и т.п.

1.5 Модель и алгоритм проектирования блочно-модульных режущих инструментов

Рассмотрим возможности обобщенного подхода к проектированию сборных режущих инструментов на примере блока резцового, торцевой фрезы и расточной головки. Наиболее наглядно структуру конструкций этих режущих инструментов иллюстрируют технологические схемы сборки.

Сборка блока резцового начинается со сборки прихвата МЗ₁ и штифта МЗ₁₂ (рис.1.5.1). Штифт МЗ₁₂ вставляется в отверстие прихвата МЗ₁. Характер соединения прихвата и штифта не дает последнему перемещаться вдоль посадочной поверхности. Полученная сборочная единица крепится к державке БР₁ с помощью винта МЗ₁₃. Предварительно на штифт помещается режущая пластина ПР и собранная конструкция зажимается винтом МЗ₁₃. Конструкция прихвата обеспечивает прижим пластины к основанию державки и боковой ее поверхности, гарантируя тем самым неподвижность пластины во время обработки. При необходимости под пластину режущую ПР устанавливается пластина опорная ПО и в торец корпуса державки вворачивается регулировочный винт.



Рисунок 1.5.1. – Технологическая схема сборки блока резцового

Технологическая схема сборки фрезы торцевой построена по тому же принципу, что и блока резцового (рис.1.5.2).

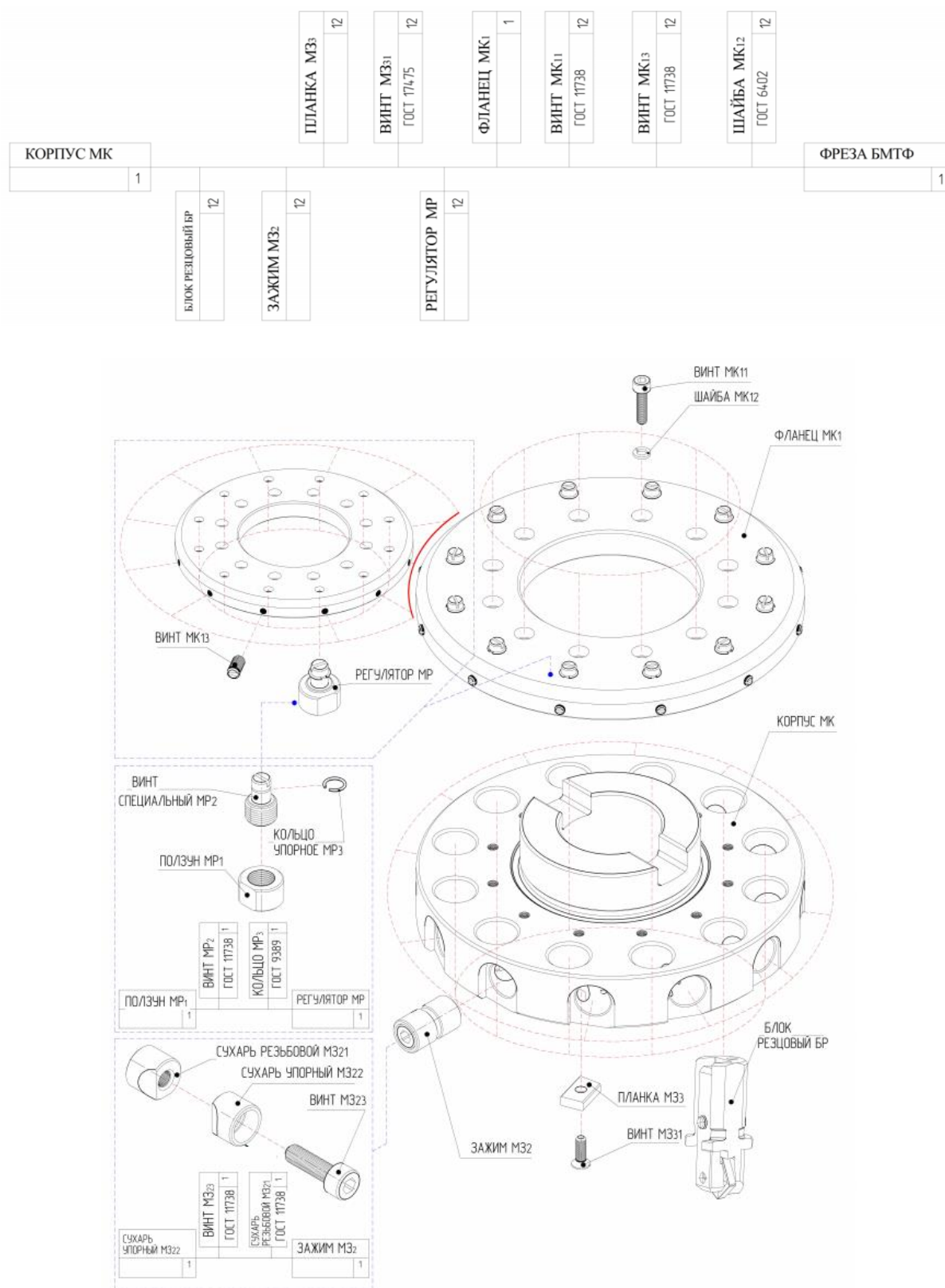


Рисунок 1.5.2. – Технологическая схема сборки фрезы торцевой

Сборка фрезы торцовой начинается с размещения модуля зажима МЗ₂ в отверстия корпуса МК фрезы БМТФ. Затем вставляются блоки резцовые БР, устанавливаются планки модуля зажима МЗ₃, которые крепятся винтами МЗ₃₁. К торцовой поверхности корпуса винтами с шайбами крепится фланец МК₁, в который вставляются регуляторы МР для регулирования положения блоков в корпусе. Регуляторы крепятся к фланцу винтами МК₁₃.

Технологическая схема сборки расточной головки представлена на рис. 1.5.3. Вначале собирается блок резцовый БР аналогично описанию по рис. 1.5.1. Затем блок резцовый БР вставляется в модуль регулировочный МР₁ (корпус ползуна МР₁₁), МР₁ вставляется в модуль корпусной МК, зажимается модулем зажимным – прихватом МЗ₁ (винт МЗ₁₁, шайба МЗ₁₂, упор МЗ₁₃). Затем вставляется в МК винт ходовой МР₁₂, гайка ползуны МР₁₃ и зажимаются упором МЗ₂₁, винтом стопорным МЗ₂₂ и шайбой МЗ₂₃.

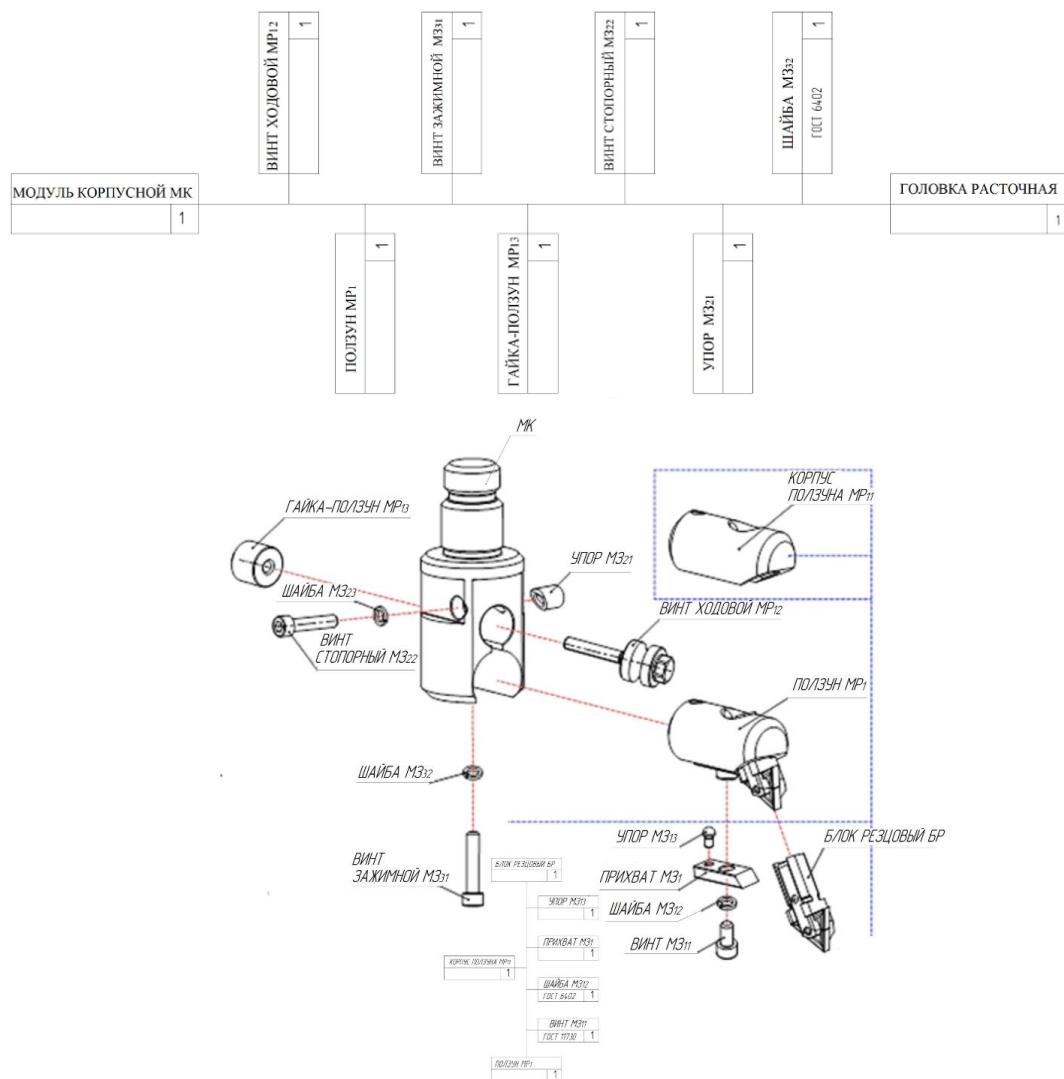


Рисунок 1.5.3. – Технологическая схема сборки головки расточной

Разработанные технологические схемы сборки блока резцового, фрезы торцевой и головки расточной позволяют формировать базы данных по их основным конструктивным элементам для автоматизированного проектирования блочно-модульных режущих инструментов.

Формализация процесса проектирования комплекта блочно-модульных режущих инструментов (БМРИ) включает создание следующих математических моделей [8,58,59]:

- модель формирования исходной информации по обрабатываемым поверхностям (П) и конструктивным элементам (КЭ);
- модель обобщенной схемы обработки резанием (ОР);
- модель обобщенной конструктивной схемы БМРИ;
- модель взаимного расположения блоков и модулей БМРИ;
- модель оценки вариантов конструкций БМРИ по критериям;
- модель оценки напряженно- деформированного состояния БМРИ.

Модель БМРИ характеризуется конструктивными, технологическими и функциональными признаками [60].

Модель БМРИ представляется в виде ориентированного графа:

$$\Gamma_1 = (X, E),$$

где X – множество вершин;

E – отклонение на множестве X , которое показывает, как между собой связаны вершины.

Каждая вершина графа Γ_1 определяет блок, модуль и конструктивный элемент или параметры блока, модуля, конструктивного элемента. Ребро P_1 представляет собой подмножество вершин графа $\Gamma_1 \subseteq X$ и одновременно $P_1 = \{x_1, x_2, x_3\}$,

где x_1, x_2 и x_3 – соответственно блок резцовый, корпусной и зажимной модули.

В свои очередь x_1, x_2, x_3 являются множествами:

$$x_1 = \{x_{11}, x_{12}, \dots, x_{1n_{px1}}\}, \dots, x_3 = \{x_{31}, x_{32}, \dots, x_{3n_{px3}}\}.$$

Здесь x_{11} – пластина режущая ПР,

x_{12} – пластина опорная ПО,

x_{13} – ломатель стружки ЛС,

$x_{14}, \dots, x_{1n_{px1}}$ – другие составляющие блока резцового БР, то есть $P_{x1} = \bigcup_{i=1}^{n_{px1}} x_{1i}$,

x_{21} – модуль корпусной МК;

x_{22} – блок резцовый БР;

x_{23}, \dots, x_{px2} – другие элементы модуля корпусного, т.е. $P_{x2} = \bigcup_{i=1}^{px2} x_{2i}$,

x_{31} – модуль зажимной МЗ₁ пластины режущей ПР;

x_{32} – модуль крепления пластины опорной ПО;

x_{33} – модуль крепления стружколома СЛ – прихвата П;

x_{34} – модуль зажимной МЗ₂ блока резцового;

x_{35} – модуль регулировочный МР блока резцового БР;

x_{36} – модуль зажимной МЗ₃ блочно-модульного режущего инструмента БМРИ;

другие составляющие (вершины x_{37}, \dots, x_{px2}) т.е. $P_{x3} = \bigcup_{i=1}^{px3} x_{3i}$.

Ребра $Px_i, \dots, Px_{px1}, Px_{21}, \dots, Px_{px2}, Px_{31}, \dots, Px_{px}$ определяют область применения элементов режущей, корпусной и крепежной частей БМРИ. Например, ребро $Px_{11} = \bigcup_{i=1}^{px1} x_{1i}$ определяет область конструктивных элементов режущей части БМРИ: x_{111} – лезвие (ПР); x_{112} – передняя поверхность; x_{113} – задняя поверхность; x_{114}, \dots, x_{px11} – другие конструктивные элементы. Модуль зажимной МЗ₁ пластины режущей ПР включает следующий набор элементов – вершин ребра:

$$Px_{31} = \{x_{311}, x_{312}, x_{313}, \dots, x_{314}, \dots, x_{px31}\};$$

x_{311} – прихват-стружколом П-СЛ;

x_{312} – штифт Ш;

x_{313} – винт В1;

x_{314}, \dots, x_{px31} – другие элементы, т.е. $Px_{31} = \bigcup_{i=1}^{px31} x_{31i}$.

Аналогичным образом описываются другие конструктивные элементы: модуль корпусной МК, модуль зажимной МЗ₂ блока резцового БР, модуль регулировочный МР, модуль зажимной МЗ₃ БМРИ на станке.

Каждый конструктивный элемент характеризуется определенными параметрами и угловыми размерами. На графе это изображено ребрами:

$$Px_{11}^1, \dots, Px_{px1}^1, Px_{21}^1, \dots, Px_{px2}^1, Px_{31}^1, \dots, Px_{px3}^1.$$

Например, лезвие (ПР) – ребро Px_{111}^1 определяется радиусом округления вершины ρ (вершины x_{111}^1), углом наклона главной режущей кромки λ (вершина x_{112}^1) и другими

параметрами (вершины $x_{113}^1, \dots, x_{px11}^1$); передняя поверхность ПР (ребро Px_{112}^1) задается передним углом γ (вершина x_{1122}^1), углом фаски (вершина x_{1123}^1), формой стружколомающих канавок (вершина x_{1124}^1), диаметром вписанной окружности (вершина x_{1125}^1) и другими параметрами (вершины $x_{1126}^1, \dots, x_{px12}^1$).

Таким образом, конструкция БМРИ на уровне модулей определяется совокупностью:

$$P_1 = \bigcup_{i=1}^3 x_i = \bigcup_{i=1} x_1 \bigcup_{i=1} x_2 \bigcup_{i=1} x_3 = \bigcup_{i=1}^{npx1} x_{1i} \bigcup_{i=1}^{npx2} x_{2i} \bigcup_{i=1}^{npx3} x_{3i} \quad (1.5.1)$$

и на уровне конструктивных элементов:

$$P_1 = \bigcup_{i=1}^{npx1} x_{1i} \bigcup_{i=1}^{npx2} x_{2i} \dots \bigcup_{i=1}^{npxpx} x_{pxi} \bigcup_{i=1}^{npx21} x_{21i} \bigcup_{i=1}^{npx22} x_{22i} \dots \bigcup_{i=1}^{npxpx2} x_{px2i} \bigcup_{i=1}^{npx31} x_{31i} \bigcup_{i=1}^{npx32} x_{32i} \dots \bigcup_{i=1}^{npxpx3} x_{px3i}. \quad (1.5.2)$$

Разработанная модель является общей для любого типа БМРИ и позволяет, во-первых, разложить на модули, блоки и конструктивные элементы любую конструкцию сборного режущего инструмента с целью получения более полного представления об ее устройстве, во-вторых, построить логическую схему технического решения и оценить работоспособность режущих инструментов. Модель является открытой и может совершенствоваться (попняться) без изменений начальной структуры.

Общая структура математической модели расчета геометрических параметров БМРИ представляется в виде графа $\Gamma_2 = (x_\Sigma, E_\Sigma)$, каждой из вершин которого соответствует локальная трехмерная система координат какого-либо элемента инструмента, а дуги графа определяют матрицы перехода между этими системами координат. Определены следующие системы координат – вершины графа:

- xz_{x11} – пластины режущей ПР;
- xz_{x12} – пластины опорной ПО;
- xz_{x13} – прихвата П стружколома ЛС;
- $xz_{x14}, \dots, xz_{xpx1}$ – других элементов режущей части;
- xz_{x21} – модуля корпусного МК;
- xz_{x22} – блока резцового БР;
- $xz_{x23}, \dots, xz_{xpx2}$ – других элементов модулей БМРИ;
- xz_{x31} – модуля зажимного МЗ₁ пластины режущей ПР;
- xz_{x32} – модуля крепления пластины опорной ПО;
- xz_{x33} – модуля крепления прихвата П;

$x_{z_{x33}}$ – модуля зажимного MZ_2 блока резового БР;

$x_{z_{x36}}, \dots, x_{z_{xпрк3}}$ – модуль крепления других элементов режущей и крепежной частей.

На рисунке 1.5.4 представлен граф координат систем БМРИ.

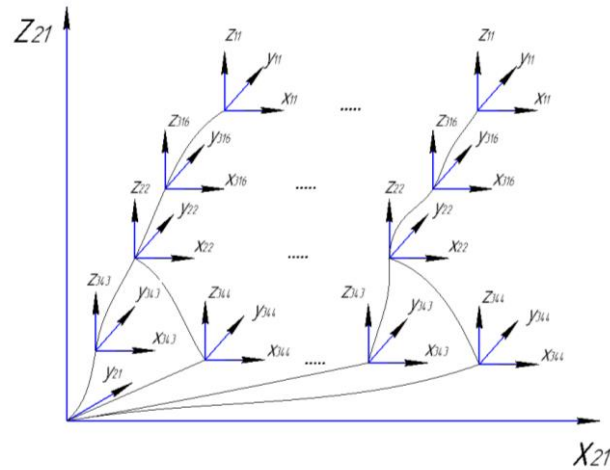


Рисунок 1.5.4. – Граф $\Gamma_2 = (x_\Sigma, E_\Sigma)$ координатных систем элементов БМРИ

Дуги графа $\Gamma_2 = (x_\Sigma, E_\Sigma)$ описывают связи между перечисленными системами координат с использованием матриц перехода.

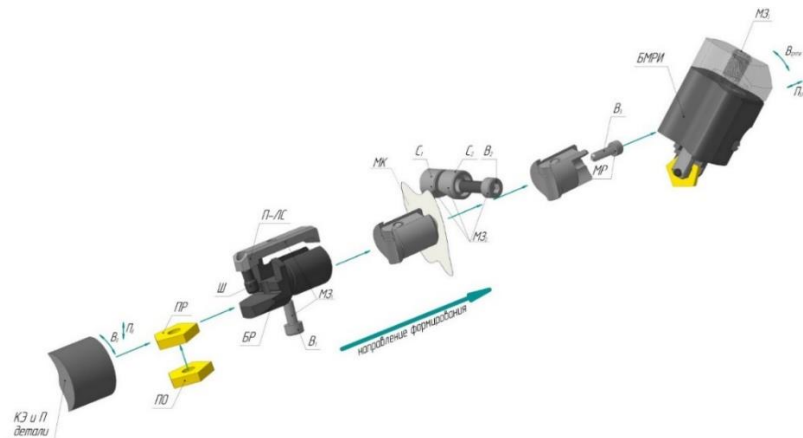


Рисунок 1.5.5. – Формирование элементов обобщенного БМРИ: $KЭ$ – конструктивный элемент, $П$ – поверхность, $П_d$ и $В_d$ – поступательное и вращательное движение детали, $ПР$ – пластина режущая, $ПО$ – пластина опорная, $БР$ – блок резовый, $Ш$ – штифт, MZ_1 – модуль зажимной $БР$, $П-ЛС$ – прихват-ломатель стружки, $В_1$ – винт 1, $МК$ – модуль корпусной, MZ_2 – модуль зажимной $БР$, C_1 и C_2 – сухари 1 и 2, $В_2$ – винт 2, $МР$ – модуль регулировочный, $В_3$ – винт $В_3$, MZ_3 модуль зажимной БМРИ, $БМРИ$ – блочно-модульный режущий инструмент, $П_{БМРИ}$ и $В_{БМРИ}$ – поступательное и вращательное движения БМРИ

Для обобщенной конструкции БМРИ на рис.5 матричное представление систем координат описано выражением, которое переводит координаты отсчета, заданные в системе:

$$[M] = [M]_{x_{11}, x_{21}} \cdot [M]_{x_{11}, x_{22}} \cdot [M]_{x_{11}, x_{316}} \cdot [M]_{x_{11}, x_{21}} \cdot [M]_{x_{11}, x_{316}} \cdot [M]_{x_{22}, x_{21}} \cdot [M]_{x_{316}, x_{22}} \times \\ \times [M]_{x_{22}, x_{343}} \cdot [M]_{x_{22}, x_{344}} \cdot [M]_{x_{343}, x_{344}} \cdot [M]_{x_{344}, x_{21}} \quad (1.5.3)$$

Переход одной системы координат в другую осуществляется перемножением матриц:

$$[M]_{xyz_i - xyz_{i+1}} = [Mx] \cdot [My] \cdot [Mz] \cdot [Mu], \quad (1.5.4)$$

где $[Mx], [My], [Mz]$ – матрицы вращения координатной системы xyz_i относительно осей x, y, z системы координат xyz_{i-1} ;

$[Mu]$ – матрица перемещений начала координат системы xyz_{i-1} .

$$[Mx] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \psi_x & \sin \psi_x & 0 \\ 0 & -\sin \psi_x & \cos \psi_x & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad [My] = \begin{bmatrix} \cos \psi_y & 0 & -\sin \psi_y & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin \psi_y & 0 & \cos \psi_y & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad (1.5.5)$$

$$[Mz] = \begin{bmatrix} \cos \psi_z & \sin \psi_z & 0 & 0 \\ -\sin \psi_z & \cos \psi_z & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad [Mu] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -\bigcup_x & -\bigcup_y & -\bigcup_z & 1 \end{bmatrix},$$

где ψ_x, ψ_y, ψ_z – углы поворота системы координат xyz_{i+1} относительно соответствующих осей координат xyz_i ;

$\bigcup_x, \bigcup_y, \bigcup_z$ – значения смещений центра системы xyz_{i+1} относительно xyz_i в направлении осей x, y, z .

Множество таких преобразований представляет модель расчета БМРИ. Система исходной информации, необходимая для проектирования обобщенной конструкции БМРИ, однозначно заданной объединениями (1), (2), представляется в виде графа $\Gamma_3 = (x, E)$. Ребро P_2 этого графа является областью формирования исходных данных, которые разбиты на три группы. Первая группа исходных данных (ребро P_{21}) характеризует обрабатываемый конструктивный элемент или поверхность. Ребро P_{22} объединяет группу исходных данных, характеризующую условия эксплуатации БМРИ (функциональные признаки). Третья группа исходных данных (ребро P_{23}) относится к процессу изготовления БМРИ (технологические признаки). Параметры БМРИ представлены на графе ребром P_3 (конструктивные признаки).

Поступательные П и вращательные В движения заготовки и инструмента обеспечивают выбор модели вида ОР.

Заключение. Разработанные технологические схемы сборки блока резцового, фрезы торцовой, головки расточной обеспечивают формирование баз данных по их основным конструктивным элементам для автоматизированного проектирования блочно-модульных режущих инструментов.

Предложенные модели и алгоритмы позволяют определить:

- положение и ориентацию режущих, опорных стружколомающих и других элементов режущей части относительно посадочного гнезда блока резцового и модуля корпусного;
- положение и ориентацию посадочного гнезда блока резцового или модуля корпусного относительно установочной базы корпуса инструмента;
- параметры установки модуля корпусного на станке второго порядка для изготовления пазов и отверстий под ПР, ПО или БР;
- взаимное расположение компонентов вне зависимости от их числа и первоначальной ориентации в местных системах координат.

1.6 Повышение точности блочно-модульных расточных режущих инструментов

Моделирование напряжений и перемещений в механизме микрометрической настройки режущих лезвий. Разработана система блочно-модульных расточных режущих инструментов (БМРРИ) с микрометрической настройкой лезвий, которая применяется на станках ЧПУ, координатно - расточных станках при обработке поверхностей отверстий в диапазоне диаметров 10...360 мм с точностью по 6-7 квалитетам [9]. Система включает расточные головки в диапазоне растачиваемых отверстий с диаметрами от 63 до 360 мм, расточные патроны – от 10 до 63 мм и резцовые блоки или резцовые вставки, в том числе с микрометрической настройкой лезвий, позволяющие обрабатывать отверстия диаметром менее 10 мм (рис. 1.6.1). Отличительными особенностями и преимуществами БМРРИ являются:

- обеспечение взаимозаменяемости и ремонтпригодности за счет унифицированных модулей: МХ – модуль хвостовой; МК1...МК3 – модуль корпусной; МП1...МП3 – модуль переходной (между МК и МБ); МБ – модуль балансировочный; МП4...МП5 – модуль переходной (между МБ и МР); МР1...МР5 – модуль регулировочный; МЗ – модуль зажимной; БР1...БР3 – блок резцовый; ПР – пластина режущая;
- технологичность изготовления и сборки за счет применения открытых плоских и цилиндрических поверхностей сопрягаемых деталей модулей;
- возможность использования модулей и резцовых блоков в других типах режущих инструментов;
- повышение точности и качества обработки за счет возможности регулировки унифицированных модулей.

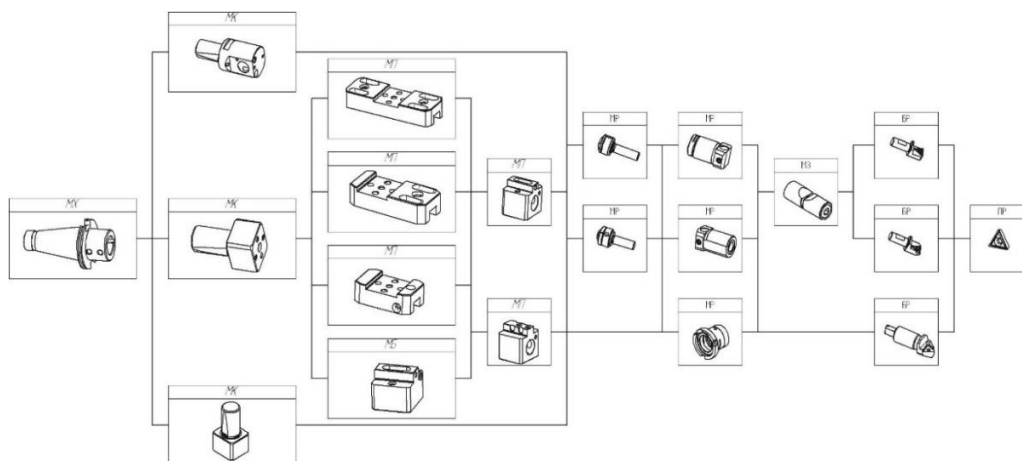
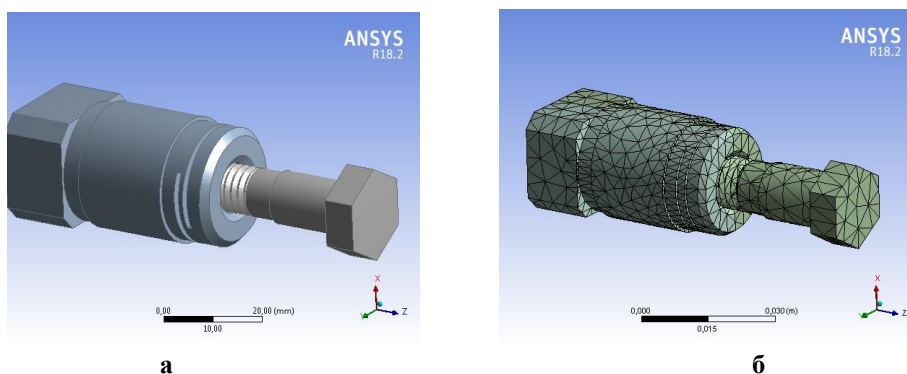


Рисунок 1.6.1. – Система блочно-модульных расточных режущих инструментов

Точность расточных режущих инструментов с регулируемыми резцовыми вставками (блоками) зависит от точности исполнения резьбового соединения «винт-гайка». Для повышения точности этого резьбового соединения, чаще всего, используется разрезная гайка (втулка), которая позволяет регулировать зазоры в резьбе и тем самым, повышать точность перемещения резцовых вставок.

Как правило, соединение винта с разрезной втулкой происходит в сжатом или разжатом состоянии втулки. Приведение резьбового соединения в рабочее положение производится путем снятия напряжения сжатия или разжатия, в результате которого происходит компенсация зазоров в резьбовом соединении. При этом ставится задача по выбору материала втулки и винта, их термообработке, допусков на резьбу винта и втулки, размеров нарезаемых пазов во втулке – глубины, ширины, шага пазов и других параметров, обеспечивающих требуемую точность перемещений при сохранении работоспособности режущего инструмента в пределах заданного стандартом периода стойкости.



а – общий вид; б - разбиение на конечные элементы
Рисунок. 1.6.2 - Трехмерная модель втулки и винта

Для решения этой задачи произведено моделирование резьбового соединения винт-втулка в программной среде «ANSYS» (рис. 1.6.2). Моделируется резьба М12 с шагом 0,5 и 1 мм, выполненная с точностью 6g. Глубина прорезаемого паза – 18 и 21 мм, ширина паза 1 и 1,5 мм, шаг паза 1 и 1,5 мм. Составляется план полного факторного эксперимента (моделирования), включающий три фактора - глубину, ширину, шаг паза во втулке, варьируемые на двух уровнях их значений – максимальном и минимальном (табл. 1.6.1).

Таблица 1.6.1. - План полного факторного эксперимента (моделирования)

	Ширина паза (b), мм	Шаг пазов (t), мм	Глубина паза (B), мм
Образец 1	1	1	18
Образец 2	1	1	21
Образец 3	1	1,5	18
Образец 4	1	1,5	21
Образец 5	1,5	1	18
Образец 6	1,5	1	21
Образец 7	1,5	1,5	18
Образец 8	1,5	1,5	21

При изменении осевой нагрузки на резьбу от 50 до 200 Н рассматриваются напряжения в резьбовом соединении и перемещения винта (рис. 1.6.3). Цель эксперимента (моделирования) - определение предельной осевой нагрузки, при которой напряжение не превосходит предела прочности заданного материала. При этом гарантируется минимальный зазор в резьбовом соединении и требуемая точность перемещений резцовой вставки.

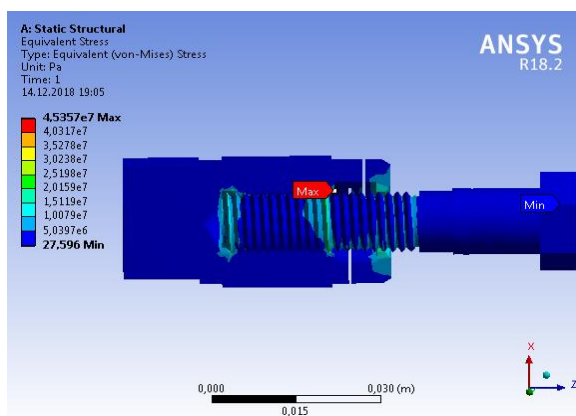


Рисунок. 1.6.3 - Карта распределения напряжений, полученная в программе Ansys

Анализ результатов моделирования показывает (рис. 1.6.4), что с увеличением нагрузки величины перемещения и напряжения растут, причем наиболее приемлемыми для последующих исследований являются образцы под номера 1, 4, 5 и 8 из таблицы 1.6.1, так как в них не возникает слишком больших и слишком малых нагрузок. Из этих вариантов выбирается наиболее рациональный образец под номером 1, так как он имеет наибольшие перемещения и обеспечивает минимальные зазоры в резьбовом соединении при любом значении нагрузки.

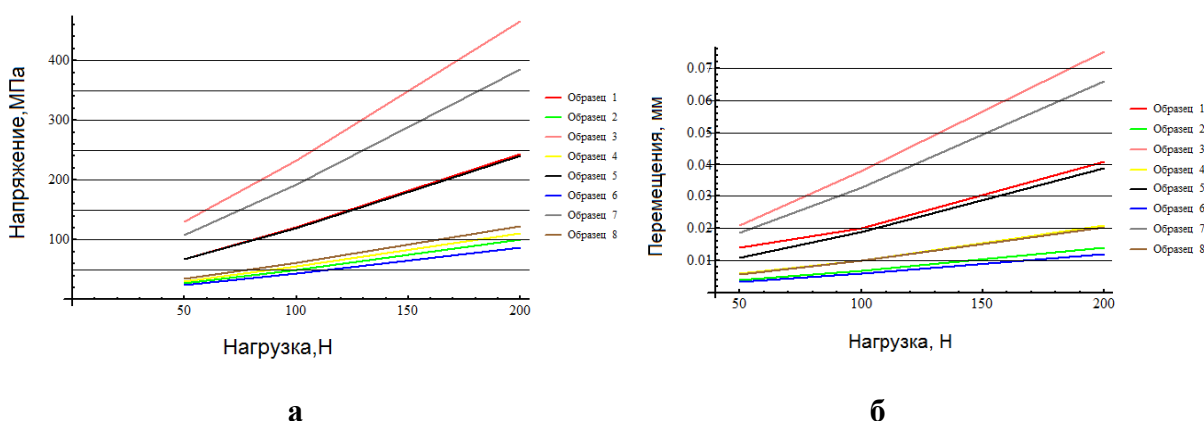


Рисунок 1.6.4 – Зависимости напряжений (а) и перемещений (б) в резьбовом соединении от нагрузки при различных размерах глубины, ширины и шага пазов образцов втулки

Экспериментальные исследования резьбовых соединений механизма настройки. При проведении экспериментальных исследований точности и жесткости резьбовых соединений «винт-втулка» использовались стандартные методики, сертифицированные материалы образцов, оборудование и измерительная аппаратура.

Образцы втулок и винта (рис. 1.6.5) изготавливаются из стали 45 ГОСТ 1050, наружный диаметр втулки – 24 мм, длина 47 мм, винты М12 6g и М12 6h с шагом резьбы 0,5; 0,75; 1; 1,5 мм.

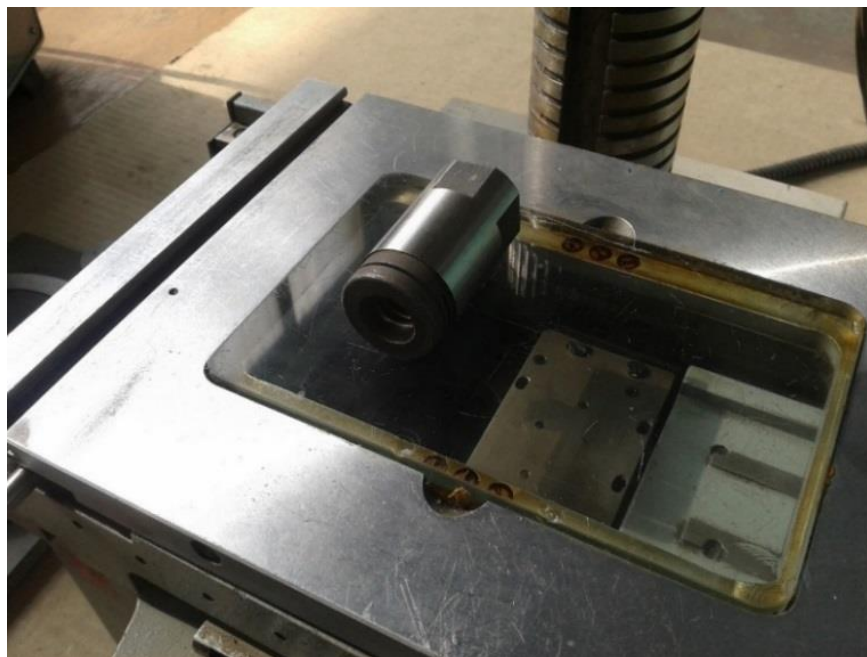


Рисунок 1.6.5 - Образец втулки

Твердость втулки 42-54 HRC, винта – 20-30 HRC. Образцы изготавливаются в количестве 8 штук по количеству опытов полного факторного эксперимента, предусматривающего изменение трех факторов (размеров пазов) на минимальном и максимальном уровнях – ширины $b=1; 1,5$ мм; шага $t=1; 1,5$ мм; глубина $B=18; 21$ мм.

Методикой эксперимента предусматривается ввинчивание винта в разрезную резьбовую втулку, которая предварительно разжимается или сжимается. После снятия усилий разжатия или сжатия втулки винт последовательно и многократно ввинчивается и вывинчивается, при этом фиксируется отклонение Δ (перемещение винта) и крутящий момент $M_{кр}$ на винте (рис. 1.6.6).

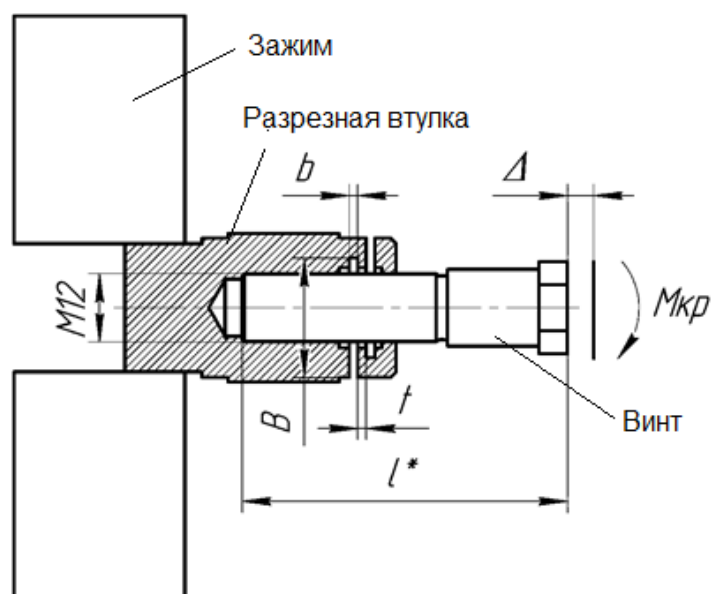


Рисунок 1.6.6– Схема физической модели перемещений и крутящих моментов

Для разжатия образцов используются мерные пластины, вставляемые в пазы втулки. Выбор размера пластин определяется заданным шагом резьбы. Для сжатия образцов используется специальный съемник. Отклонение перемещений винта фиксируется на измерительном микроскопе модели Norgau NVM-4030D. На данном микроскопе также измеряются размеры пазов во втулке и шаг резьбы. Для измерения крутящего момента используется динамометрический ключ. Жесткость резьбового соединения определяется с помощью динамометра модели ЗИП 05-82.

Таблица 1.6.2. – Разница размеров втулок до и после разжатия

№ втулки	Ширина паза (b), мм	Шаг пазов (t), мм	Глубина паза (B), мм	Значение			
				Измерение 1	Измерение 2	Измерение 3	Среднее
1	1	1	18	1,06	1,01	1,08	1,05
2	1	1	21	1,07	1,01	0,98	1,02
3	1	1,5	18	1,02	1,12	1,06	1,07
4	1	1,5	21	0,94	0,96	1,02	0,98
5	1,5	1	18	1,51	1,43	1,51	1,49
6	1,5	1	21	1,57	1,6	1,44	1,54
7	1,5	1,5	18	1,48	1,55	1,5	1,51
8	1,5	1,5	21	1,46	1,44	2,5	1,47

В результате экспериментальных исследований установлено (табл. 1.6.2), что отклонение длины втулки до и после разжатия близки к размерам ширины пазов и кратны шагу резьбы. Измерение крутящих моментов показывает (табл. 1.6.3-4), что уменьшение зазора в резьбовом соединении (резьба M12 6h) приводит к росту значений крутящих моментов примерно в 1.3 – 1.5 раза. Значения крутящих моментов также возрастает при уменьшении глубины паза с 21 до 18 мм. Установлено, что винт перемещается без люфтов

и резьба не деформируется при равной ширине и шаге пазов и их значениях равных от одного до двух шагов резьбы.

Таблица 1.6.3. – Моменты от винта 6h при разжатии втулки

№ образца	Ширина паза (b), мм	Шаг пазов (t), мм	Глубина паза (B), мм	Момент, Н*м (расклинено)	Момент, Н*м (вставки убраны)	Плечо, м
1	1	1	18	1	1,5	0,1
2	1	1	21	0	0,5	0,1
3	1	1,5	18	0,5	1	0,1
4	1	1,5	21	0	0,5	0,1
5	1,5	1	18	0	0	0,1
6	1,5	1	21	0	0	0,1
7	1,5	1,5	18	2,5	8	0,1
8	1,5	1,5	21	1,5	4	0,1

Таблица 1.6.4. – Моменты от винта 6g при разжатии втулки

№ образца	Ширина паза (b), мм	Шаг пазов (t), мм	Глубина паза (B), мм	Момент, Н*м (расклинено)	Момент, Н*м (вставки убраны)	Плечо, м
1	1	1	18	0,5	1	0,1
2	1	1	21	0	0,5	0,1
3	1	1,5	18	0	0,5	0,1
4	1	1,5	21	0	0,5	0,1
5	1,5	1	18	0	0	0,1
6	1,5	1	21	0	0	0,1
7	1,5	1,5	18	1	5	0,1
8	1,5	1,5	21	0	2,5	0,1

Аналогичные зависимости отклонений длины втулки и крутящих моментов установлены при исследовании резьбовых соединений в предварительно сжатом состоянии (табл. 1.6.5-6): при уменьшении зазора в резьбе (винт M12 6h) крутящий момент возрастает примерно в 1,5 раза. Моменты в резьбовом соединении при ввинчивании винта в сжатую втулку не возникают из-за отсутствия отклонения осей двух частей втулки. Винт перемещается без люфтов, и резьба не деформируется при равной ширине и шаге пазов в пределах от одного до двух шагов резьбы.

Таблица 1.6.5. – Моменты от винта 6h при сжатии втулки

№ образца	Ширина паза (b), мм	Шаг пазов (t), мм	Глубина паза (B), мм	Момент, Н*м (сжато)	Момент, Н*м (напряжение снято)	Плечо, м
1	1	1	18	0	1,5	0,1
2	1	1	21	0	1	0,1
3	1	1,5	18	0	1	0,1
4	1	1,5	21	0	0,5	0,1
5	1,5	1	18	0	0	0,1
6	1,5	1	21	0	0	0,1
7	1,5	1,5	18	0	4,5	0,1
8	1,5	1,5	21	0	2	0,1

Таблица 1.6.6. – Моменты от винта 6g при сжатии втулки

№ образца	Ширина паза (b), мм	Шаг пазов (t), мм	Глубина паза (B), мм	Момент, Н*м (сжато)	Момент, Н*м (напряжение снято)	Плечо, м
1	1	1	18	0	1	0,1
2	1	1	21	0	0,5	0,1
3	1	1,5	18	0	0	0,1
4	1	1,5	21	0	0,5	0,1
5	1,5	1	18	0	0	0,1
6	1,5	1	21	0	0	0,1
7	1,5	1,5	18	0	4	0,1
8	1,5	1,5	21	0	2	0,1

Значения крутящих моментов при предварительном сжатии втулок ниже на 25-50% по сравнению с разжатием, что позволяет изготавливать втулки с большими значениями размеров паза при больших значениях шага резьбы.

Измерение жесткости разрезных втулок показывает, что увеличение глубины паза с 18 до 21 мм приводит к уменьшению жесткости втулки в 1,5 – 1,7 раза.

Результаты проведенного моделирования и экспериментальных исследований позволили предложить расточной инструмент [4], в котором глубина пазов определяется по формуле:

$$B=D-t,$$

где D – внешний диаметр резцедержателя; t – шаг пазов.

Разработана гамма расточных головок, патронов и резцовых вставок, реализующих инструментальную систему БМРПИ [9]. Отличительной особенностью этой гаммы инструментов является наличие унифицированной разрезной резьбовой втулки, позволяющей компенсировать зазоры в резьбе. Например, разработанная резцовая вставка на рисунке 1.6.7 включает: 1- сборочный узел «резьбовая вставка», 2- стакан, 3 – втулка, 4 – шарик, 5 – пробка.

В «резьбовой вставке» 1 державка-винт служит для установки режущей пластины и ее перемещения за счет резьбового соединения с втулкой 3, выполненного со степенью точности 4g ÷ 6g. Для компенсации возможных зазоров в резьбовом соединении во втулке выполнены радиальные пазы, размеры которых определяются на основе рассмотренных выше результатов моделирования и эксперимента. На внешней поверхности втулки 3 и внутренней поверхности стакана 2 выполнена канавка, в которую при сжатии разрезной втулки, устанавливаются закаленные шарики 4 через отверстие в стакане закрываемое пробкой 5. Шарики перекатываются в канавках втулки и стакана, передают упругую силу от стакана к втулке, тем самым минимизируя зазор в резьбовом соединении. Шарики

способствуют уменьшению трения в резьбе при значительных усилиях предварительного натяга.

Лабораторные и производственные испытания экспериментальных образцов резцовых вставок показали их работоспособность. Точностные параметры резцовых вставок не уступают зарубежным аналогам.

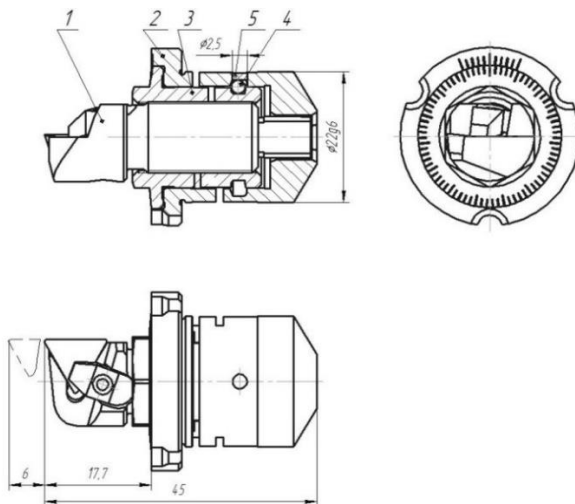


Рисунок 1.6.7. – Резцовая вставка с креплением режущей пластины прихватом

Выводы. Получена математическая модель расчета напряжений и перемещений в БМРРИ, позволяющая оптимизировать геометрические параметры винта и разрезной втулки в механизмах настройки режущих лезвий.

Установлены зависимости напряжений и перемещений в деталях и соединениях модулей от нагрузок на механизм настройки, позволяющие научно обосновать уменьшение зазоров в резьбовом соединении для повышения точности и жесткости инструмента.

Рекомендуется для создания требуемого натяга в резьбовом соединении предварительное сжатие резьбовой втулки со следующими размерами пазов: глубиной – 4/5 от диаметра втулки, равными значениями ширины и шага в диапазоне их размеров от одного до двух шагов резьбы.

Разработана инструментальная система и новые конструкции блочно-модульных расточных головок, патронов и резцовых вставок, отличающихся повышенной точностью и жесткостью.

1.7 Исследование степени сложности машиностроительных изделий

В XXI веке актуально решение задачи по переходу предприятий машиностроения на освоение и выпуск новой конкурентоспособной продукции. При этом наименование и номенклатура принимаемой к освоению продукции часто не совпадают с продукцией выпускаемой производством. Требуется объективная и быстрая (экспертная) оценка не только технических возможностей предприятия, но и экономических затрат на производство новой продукции. Такая оценка возможна по предлагаемой методике, сопоставляющей новую продукцию с продукцией, выпускаемой предприятием в настоящее время [8]. При этом оценивается целесообразность экономических расходов при внедрении современного оборудования с ЧПУ, инструментов с многогранными неперетачиваемыми пластинами (МНП), применения многослойных покрытий, технологической оснастки, построенной по блочно-модульному принципу и т.д.

Создание экспертной системы на стадиях технического предложения приводит к появлению в ней различных постоянных и изменяющихся признаков, степень влияния и ранжирование которых порой сложно определить. Наличие неопределенности ведет к принципиально неустранимой ни при каких условиях неточности при установлении затрат труда. Как правило, величина затрат труда может быть указана лишь в пределах какого-то интервала, иногда весьма большого для предприятия.

Таким образом, для перехода предприятия на изготовление новой продукции в рамках своего производства или организации нового производства необходимо разрабатывать бизнес-план или производить моделирование затрат на выпускаемую и новую продукции. Одним из функциональных показателей этой модели может быть принята степень сложности изделия и его структурных составляющих.

Необходимость оценки целесообразности освоения и выпуска новых изделий с точки зрения технологических возможностей производства, а также потребность в систематизации и создании классификации сложных изделий и методов их формообразования в виду их многообразия обуславливает более широкое введение в теорию и практику машиностроения показателя (признака) степени сложности производственных систем, изделий и составляющих их элементов, методов формообразования поверхностей деталей и методики их количественной оценки.

В данной работе рассматриваются примеры применения этого показателя в различных отраслях промышленности. Приведен анализ существующих подходов и методик по оценке степени сложности, и предлагаются классификационные, нормативные

и расчетные основы проектирования технологического оснащения с учетом степени сложности.

Определение степени сложности изделий в машиностроении. Методика оценки степени сложности станков и инструмента предусматривает обязательное ограничение количества рассматриваемых объектов с ориентацией на наиболее часто применяемые. В связи с этим был проведен анализ количество закупаемых станков, по данным известной аналитической компании «Gardner Research» (таблица 1.7.1)

Таблица 1.7.1 - История закупок оборудования, млн. долларов

Наименование исследований	оборудования/годы	2009	2012	2013	2014	2015
<i>Горизонтальные центры:</i>	<i>обрабатывающие</i>	788,5	1341,9	1647,8	1992,8	1674,1
<i>Вертикальные центры:</i>	<i>обрабатывающие</i>	578,7	1315,9	1380,8	1154,2	1552
<i>Токарные станки:</i>		706,6	1511,3	1113,5	968,7	1475,8
<i>Многоцелевые токарные станки:</i>		448,1	1291,9	776,9	1159,4	1501,7
<i>Шлифовальные:</i>		204,4	427,5	368,6	455,6	697,0
<i>Электроэрозионные:</i>		35,5	97,8	94,4	133,3	204,6
<i>Автоматы:</i>		441,7	300,3	355,0	586,7	1369,0
<i>Аддитивное производство:</i>		0,0	0,0	0,0	37,0	153,7

Исходя из данных таблицы 1.7.1, можно оценить, со станками каких типов возможно выйти на мировой рынок в 2015 году, а с какими не стоит и пытаться. В качестве критерия выбора можно принять превышения темпов роста потребности в станках над запасом по загрузке оборудования (порядка 35%). Дополнительно следует учитывать наличие или отсутствие устойчивого роста выпуска станков данного типа в предыдущие годы. Например, имеет смысл обратить внимание на установки для лазерной резки (рост 90%, +55 млн), вертикальные многоцелевые токарные станки (рост 100%, +100 млн) или сверлильные станки (дополнительная потребность +340 млн).

Как видно из рисунка 1.7.1, наиболее интенсивно закупаются аддитивные технологии и станки автоматы, второе место по степени закупаемости занимают электроэрозионные станки, многоцелевые станки и обрабатывающие центры. Традиционно пользуются спросом станки токарной и шлифовальной группы, по интенсивности закупок они занимают третье место. Отдельно следует обратить внимание

на развитие оборудования для т.н. аддитивного производства (Additive Manufacturing). Многие современные мегакорпорации активно развивают направление 3D – прототипирования, используя данную технологию для получения деталей различных наименований. На рисунке 1.7.2 показаны в какие из исследуемых лет были максимальные закупки того или иного оборудования. Анализируя полученные графики можно сделать вывод, что наибольшие активности закупки оборудования проявлялись в 2012 и 2015 годах.

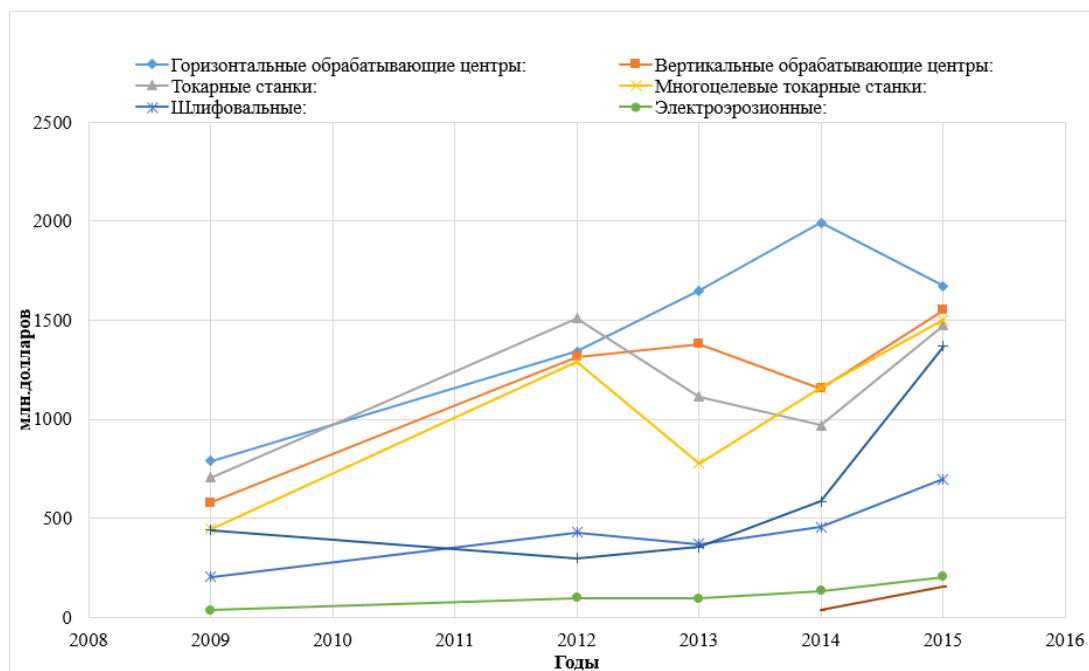


Рисунок 1.7.1 - История закупок оборудования в 2009 -2015 годах

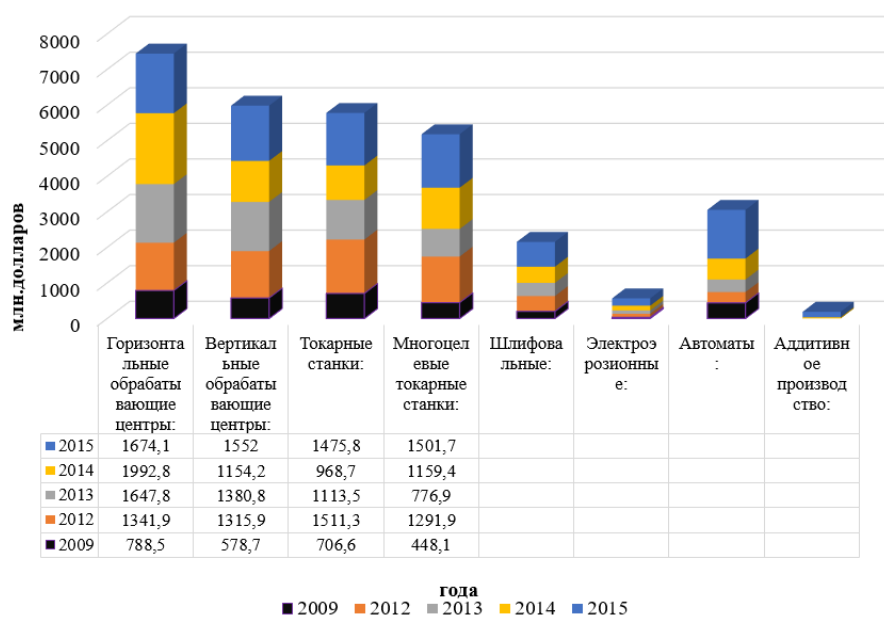


Рисунок 1.7.2- Ранжирование применения оборудование по годам исследования

Анализируя соотношение затрат стандартизированного инструмента, используемого на заводах по группам, можно сделать вывод, что подавляющую часть затрат -88,6% составляют затраты на инструмент для обработки резанием (рисунок 1.7.3) . При этом, рассматривая затраты по группам инструментов, можно выделить три лимитирующих группы, которые составляют основной процент затрат- резцовый, фрезерный и сверлильный (рисунок 1.7.4).



Рисунок 1.7.3 -Соотношение затрат стандартизированного инструмента

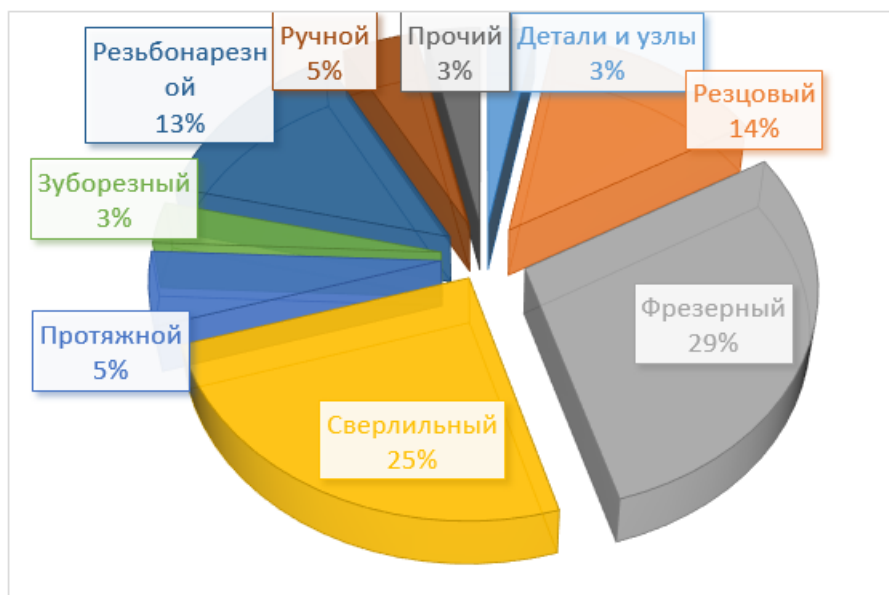


Рисунок 1.7.4 -Соотношение затрат стандартизированного инструмента

В 2014 впервые с января 2008 года загрузка оборудования достигла отметки 78.6%. Существует статистическая связь между стоимостью закупок нового и степенью загрузки уже установленного оборудования (рисунок 1.7.5), поэтому и по этой

причине в 2015 году следует ожидать существенного роста закупок технологического оборудования.

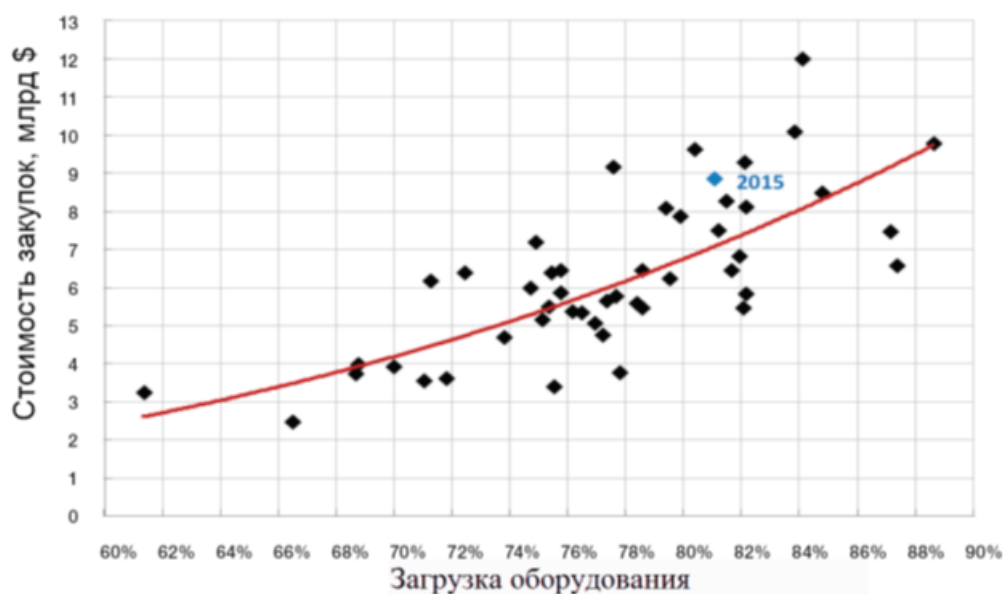


Рисунок 1.7.5 – Связь между загрузкой технологического оборудования и объемом закупок нового оборудования

Вероятно, рост станкостроительной индустрии РБ находится в области разработки оборудования для индустриального аддитивного производства. В этой области еще нет ярко выраженных монополистов, высоки ожидания появления новых производителей, никому не известных фирм и технологий, в том числе из развивающихся стран. Это может быть не только оборудование для «чисто» аддитивного производства, но и гибридные станки.

Исходя из анализа вышеперечисленных материалов предложена методика расчета степени сложности изделий машиностроения [8]. Реализация методики связана с введением ряда понятий и определений.

Новое изделие - изделие, впервые принимаемое предприятием к производству.

Базовое изделие - изделие, ранее выпускавшееся предприятием серийно или массово.

Простейшее изделие - изделие с минимальным количеством структурных составляющих, определяющих его вид. Например, признаки (ключевые слова), характерные для простейшего станка, включают следующие: станина, шпиндельная бабка, шпиндель, платформа для установки инструмента или заготовки.

Условная деталь - деталь, имеющая массовое использование в машиностроительных изделиях. В качестве условной детали целесообразно использовать вал среднестатистической степени сложности, поскольку именно валы имеют наибольший

процент применения в современных машинах и токарных станках составляют большую часть производственного парка металлорежущих станков

Приведенная деталь - деталь, структурная сложность которой выражается числом содержащихся в ней условных деталей.

Структурная сложность - отношение числа деталей изделия к числу деталей простейшего изделия.

Эквивалент структуры детали - число условных деталей в структуре приведенной детали.

Эквивалент структуры узла (сборочной единицы) равен сумме эквивалентов структуры всех приведенных деталей в узле:

$$Z_i = \sum_{k=1}^p Z_K^D + Z_{MD}^{\delta}, \quad (1.7.1)$$

где Z_i - эквивалент структуры узла; Z_K^D - эквивалент структуры приведенной детали; Z_{MD}^{δ} - эквивалент структуры мелкогазмерных деталей; k - порядковый номер приведенной детали узла; p - количество приведенных деталей в узле.

Мелкогазмерной деталью считается деталь, трудоемкость изготовления которой составляет от трудоемкости условной детали величину второго и более высоких порядков малости.

Эквивалент мелкогазмерных деталей определяется по формуле:

$$Z_{MD} = \frac{M_{\Sigma D}}{M^{yD}}, \quad (1.7.2)$$

где $M_{\Sigma D}$ - масса всех мелкогазмерных деталей; M^{yD} - масса условной детали.

Эквивалент структуры изделия - характеристика структурной сложности изделия, которая определена как сумма эквивалентов структуры всех узлов (сборочных единиц), механизмов и отдельных, не входящих в узлы и механизмы деталей, например, станка:

$$Z_n = \sum_{m=1}^q Z_{im} + \sum_{n=1}^r Z_{mn} + \sum_{l=1}^s Z_{dl}, \quad (1.7.3)$$

где m, n и l - порядковый номер соответственно узлов, механизмов и деталей; q, r и s - количество в изделии соответственно узлов, механизмов и деталей; Z_{im}, Z_{mn}, Z_{dl} - эквиваленты структуры соответственно узла, механизма и детали.

Эквивалент структуры изделия можно представить также как сумму всех приведенных деталей изделия:

$$Z^n = \sum_{n=1}^f Z_{Д}^i, \quad (1.7.4)$$

где $Z_{Д}^i$ - эквивалент структуры приведенной детали; n - порядковый номер очередной рассматриваемой детали изделия; f - общее количество приведенных деталей в изделии.

Эквивалент структуры условной детали - это мера измерения эквивалентов структуры узлов, механизмов и деталей (равна единице).

Эквивалент структуры простейшего изделия - определяется как сумма эквивалентов всех его составляющих.

Показатель степени сложности изделия - безразмерная величина, косвенно отражающая конструкторскую, технологическую и эксплуатационную специфику изделия.

Коэффициент выбора изделия - безразмерная величина равная отношению показателей степени сложности нового и базового изделий.

Алгоритм определения показателя степени сложности изделия включает следующие основные этапы [8].

1 Определяется условная деталь, которая должна быть общая для простейшего, базового и нового изделий. Как правило, выбирается из перечня валов базового изделия следующим образом: выбираются валы с наименьшей и наибольшей трудоемкостью проектирования или изготовления, и рассчитывается средняя величина. Из перечня валов находится вал с такой же или близкой трудоемкостью изготовления, который и принимается за условную деталь.

2. Определяется эквивалент приведенных деталей:

$$Z_i^{ПД} = \frac{T^{ПД}}{T^{УД}}, \quad (1.7.5)$$

где $T^{ПД}$ - трудоемкость изготовления приведенной детали; $T^{УД}$ - трудоемкость изготовления условной детали.

3. Рассчитывается эквивалент структуры простейшего изделия, как сумма эквивалентов его составных частей:

$$Z^{ПШ} = \sum Z_i^{ПА}. \quad (1.7.6)$$

4 Рассчитывается эквивалент структуры базового изделия:

$$Z^{вИ} = Z_{\epsilon}^{вИ} + Z_o^{бИ} + Z_{\kappa}^{бИ} + Z_{\mathcal{M}}^{бИ} + Z_{\Sigma_{нд}}^{бИ} + Z_i^{бИ}, \quad (1.7.7)$$

где $Z_{\text{в}}^{\text{бу}}$ - количество валов; $Z_{\text{о}}^{\text{бу}}$ - количество опор; $Z_{\text{к}}^{\text{бу}}$ - количество корпусов;
 $Z_{\text{м}}^{\text{бу}}$ - количество шестерен; $Z_{\Sigma \text{нд}}^{\text{бу}}$ - количество нормализованных деталей.

5 Рассчитывается эквивалент структуры нового изделия

$$Z^{\text{ну}} = Z_{\text{в}}^{\text{ну}} + Z_{\text{о}}^{\text{ну}} + Z_{\text{к}}^{\text{ну}} + Z_{\text{ш}}^{\text{ну}} + Z_{\Sigma \text{нд}}^{\text{ну}} + Z_{\text{д}}^{\text{ну}}. \quad (1.7.8)$$

6 Рассчитываются поправочные коэффициенты для базового и нового изделий (станка):

- Коэффициент концептуальной сложности:
- Коэффициент новизны решения:
- Коэффициент изменения массы:
- Коэффициент изменения габаритного размера:
- Коэффициент изменения эксплуатационных характеристик:
- Выбирается коэффициент условий испытаний:

7 Рассчитывается группа структурной сложности базового и нового изделий:

$$G_{\text{сс}}^{\text{бу}} = \frac{Z^{\text{бу}}}{Z^{\text{ли}}} \quad (1.7.9)$$

$$G_{\text{сс}}^{\text{ну}} = \frac{Z^{\text{ну}}}{Z^{\text{ли}}}.$$

Структура простейшего изделия $Z^{\text{ну}} = 1$.

8. Рассчитывается показатель степени сложности базового и нового изделий:

$$Q^{\text{бу}} = G_{\text{сс}}^{\text{бу}} \cdot K_{\text{к}}^{\text{бу}} \cdot K_{\text{н}}^{\text{бу}} \cdot K_{\text{м}}^{\text{бу}} \cdot K_{\text{в}}^{\text{бу}} \cdot K_{\text{э}}^{\text{бу}} \cdot K_{\text{и}}^{\text{бу}},$$

$$Q^{\text{ну}} = G_{\text{сс}}^{\text{ну}} \cdot K_{\text{к}}^{\text{ну}} \cdot K_{\text{н}}^{\text{ну}} \cdot K_{\text{м}}^{\text{ну}} \cdot K_{\text{в}}^{\text{ну}} \cdot K_{\text{э}}^{\text{ну}} \cdot K_{\text{и}}^{\text{ну}}. \quad (1.7.10)$$

9. Определяется коэффициент выбора изделия:

$$K_{\text{в}} = \frac{Q^{\text{ну}}}{Q^{\text{бу}}}. \quad (1.7.11)$$

Произведен расчет степени сложности станков по методике, приведенной в [8], применительно к изделиям станкостроения, выпускаемых Витебским станкостроительным заводом «Вистан». В качестве нового изделия для данного предприятия был взят деревообрабатывающий продольно-фрезерный четырехсторонний станок модели ВШ-160-5С, за базовое изделие принят токарно-винторезный станок модели 16ВТ20 - аналог широко распространенного в промышленности станка модели 16К20, простейшим изделием послужил токарный «министанок» модели ВШ-028, группа структурной сложности которого была принята за единицу. Была произведена выборка

трудоемкостей изготовления отдельных узлов и деталей нового и базового станков, а также их масс, фрагменты которой для базового станка представлены в таблице 1.7.1. За условную деталь в этих изделиях был взят вал среднестатистической сложности по конфигурации и трудоемкости (позиция 4 в таблице 1.7.2). Остальные детали станков приводились по эквиваленту структуры к этому валу. Статистическая обработка данных производилась с применением стандартного пакета прикладных программ «STAN», результаты которой представлены в таблице 1.7.3.

Таблица 1.7.2 – Выборка данных для регрессионного анализа базового станка

№ п/п	Наименование Детали	Номер детали	Трудоемкость, $T^{бн}$, ч	Количество, $N_{л}^{бн}$, шт	Масса, $M_{л}^{бн}$, кг	Эквивалент структуры, $Z_{д}^{бн}$
1	Вал		1.3685	1		
2	Вал		0.569	1		
3	Вал		1.4985	1		
4	Вал	03.00.018-02	1.298	1 (усл. дет)	1.4	1
...
18	Станина		58.4332	1	1320	45
19	Корпус		17.3095	1	59	13.3
...

Таблица 1.7.3 – Основные показатели сложности станков

Вид изделия	Модель станка	Эквивалент структуры, $Z_{\bar{A}}$	Эквивалент массы, $Z_{\bar{M}}$	Структурная сложность, G_{cc}	Показатель сущностной сложности, Q
Простейшее	Министанок ВШ-028	51.5681	150.97	1	1
Базовое	Токарно-винторезный 16ВТ-20	213.5285	891.0077	4.14	7.192
Новое	Продольно-фрезерный ВШ-160-5с	147.507	984.677	2.86	4.0518

Как видно из таблицы 1.7.3, эквивалент структуры, структурная сложность и в целом показатель сложности нового станка меньше, чем базового, что позволяет сделать вывод о технической целесообразности для предприятия осваивать новый станок. Вместе с тем масса нового станка несколько выше, чем у базового, что еще раз подтверждает вывод о некорректности оценки сложности станков по их массе. При этом возникает задача по определению интервала масс и трудоемкостей, в котором возможна оценка сложности станков как по одному, так и по другому показателю, а также выявление тех узлов и деталей, за счет которых произошло изменение сложности станка. С этой целью был произведен регрессионный анализ данных, в котором трудоемкость T была принята независимой переменной, а масса M - зависимой переменной. Результаты анализа представлены в таблице 1.7.4 и свидетельствуют о том, что трудоемкость T линейно зависит от массы M . Определенный доверительный интервал трудоемкости ($0,46 < T < 2,15$) и массы ($0,36 < M < 2,97$) позволяет судить, во-первых, об интервале изменения массы, при котором возможна оценка сложности станков по этому показателю и, во-вторых, о тех деталях, за счет которых произошло изменение сложности нового станка по сравнению с базовым. Так, например, из графиков на рисунке 1.7.1 видно, что деревообрабатывающий станок сложнее министанка за счет деталей массой до 2,97 кг и трудоемкостью до 2,11 ч.

Таблица 1.7.4 - Результаты регрессионного анализа сложности станков

Модель станка	Зависимость $T=f(M)$	Коэффициент корреляции, K	Трудоемкость условной детали, $T_{уд}$, ч	Масса условной детали, $M_{уд}$, кг
Министанок ВШ-028	$0.817+0.435M$	0.814	1.843	0.65
Токарно-винторезный 16ВТ-20	$1.757+0.134M$	0.88	1.843	0.65
Деревообрабатывающий ВШ-160-5С	$1.58+0.178M$	0.886	1.843	0.8

В общем виде доверительный интервал варьирования трудоемкостью и массой может быть представлен как:

$$\frac{1}{T_i^{\max}} \leq T_i \leq T_i^{\max}, \quad \frac{1}{M_i^{\max}} \leq M_i \leq M_i^{\max}, \quad (1.7.12)$$

где T_i^{\max} и M_i^{\max} - максимальные трудоемкость и масса, при которых эти характеристики сопоставимы и могут быть равноценно использованы при определении сложности станков.

В связи с конверсией производства предлагаются методы и алгоритмы оценки технологических возможностей (технического базиса) предприятия путём сравнения базовых и новых (принимаемых к производству) изделий, оценки сложности спроектированных изделий с применением методов математической статистики.

В реалиях современной промышленности проблема конверсии не столь актуальна, но возникает новая задача, которая заключается в быстрой реакции производства на стремительно изменяющийся рынок, в частности, решение проблемы диверсификации. Сроки актуальности изделий уменьшаются, возникают новые решения, которые влекут за собой производство новой и более современной продукции. Экспертная система оценки степени сложности должна решить данную проблему, позволив оценить возможности текущего производства и показать степень ее модернизированности.

Концепция мобильного предприятия на определенных этапах реорганизации и развития предлагает оценку степени сложности изделий на по конструктивным, технологическим и функциональным показателям (рисунок 1.7.6).

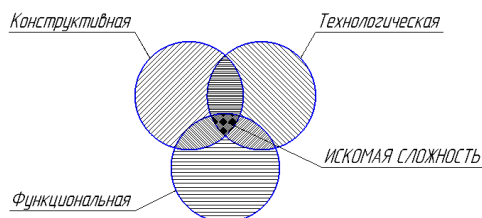


Рисунок 1.7.6- Степень сложности

Степень сложности рассчитывается по следующим формулам:

$$Q_c = Q_K^{X_K} \cdot Q_T^{Y_T} \cdot Q_\Phi^{Z_\Phi},$$

где Q_K , Q_T , Q_Φ – степень сложности соответственно конструктивная, технологическая и функциональная;

x_K , y_T , z_Φ – показатели влияния соответственно конструктивной, технологической и функциональной сложности на общий показатель сложности.

Каждый из показателей определяется через трудоемкость и поправочные коэффициенты:

$$Q_K = T_K \cdot K_K, \quad Q_T = T_T \cdot K_T, \quad Q_\Phi = T_\Phi \cdot K_\Phi,$$

где T_k , T_t , T_f - трудоемкость соответственно проектирования, изготовления и эксплуатации изделия;

K_k , K_t , K_f - поправочные коэффициенты, учитывающие отличие данных условий от тех, при которых оценивалась трудоемкость (нормативная).

При оценке степени сложности изделий возникает необходимость классификации их поверхностей и конструктивных элементов.

Исходя из анализа вышеперечисленных материалов предложена методика расчета степени сложности изделий машиностроения [1]. Реализация методики связана с введением ряда понятий и определений.

Новое изделие - изделие, впервые принимаемое предприятием к производству.

Базовое изделие - изделие, ранее выпускавшееся предприятием серийно или массово.

Простейшее изделие - изделие с минимальным количеством структурных составляющих, определяющих его вид. Например, признаки (ключевые слова), характерные для простейшего станка, включают следующие: станина, шпиндельная бабка, шпиндель, платформа для установки инструмента или заготовки.

Условная деталь - деталь, имеющая массовое использование в машиностроительных изделиях. В качестве условной детали целесообразно использовать вал среднестатистической степени сложности, поскольку именно валы имеют наибольший процент применения в современных машинах и токарных станках составляют большую часть производственного парка металлорежущих станков

Приведенная деталь - деталь, структурная сложность которой выражается числом содержащихся в ней условных деталей.

Структурная сложность - отношение числа деталей изделия к числу деталей простейшего изделия.

В отличие от известных подходов, предлагаемая методика оценки сложности, предусматривает обязательное ограничение объектов и процессов производства по частоте встречи или применяемости и моделирование ситуации с наиболее часто встречающимися или имеющими наибольшее применение в производстве. Это существенно сокращает время на проведение экспертизы.

Анализ по выпуску изделий на предприятиях позволяет выделить следующие возможные ситуации:

1. Предприятие выпускает базовое изделие, близкое по номенклатуре новому.
2. Предприятие не выпускает изделие, близкое по номенклатуре новому.

3. Предприятие планирует выпускать новое изделие и созданием соответствующего технологического базиса.

Исследуя применимость машиностроительного оборудования и инструмента целесообразно сделать наибольший акцент на следующем оборудовании:

- многоцелевые обрабатывающие центры;
- токарные станки;
- шлифовальные станки.

А для инструмента наибольшая применимость характера для следующих групп:

- фрезерный;
- сверлильный;
- резцовый.

В Полоцком государственном университете в настоящий момент ведется разработка автоматизированной экспертной системы для анализа машиностроительного оборудования по показателю степени сложности, который должен быть основан на нормативных документах и действующих стандартах, и связан с экономическими показателями, а также учитывать современные тенденции развития техники и помогать оценить эффективность оборудования и инструмента на современном рынке.

Для апробации методики были проведены исследования группы шпинделей шлифовальной группы.

Сопоставляя полученные данные и сведения о трудоемкости изготовления каждого из шпинделей можно сделать вывод о практически линейной зависимости степени сложности и трудоемкости изготовления деталей.

Проведенный анализ исследований степени сложности изделий машиностроение показал достоинства и недостатки методик оценки степени сложности, а также то, что применяемые теоретические подходы и методики разнообразны и трудоемки в практическом применении. Отмечен факт отсутствия единой методики оценки степени сложности, что приводит к различного вида неточностям и погрешностям при попытке интерпретировать результаты исследований и расчетов. Предложено оценивать затраты на разработку модульных конструкций технологического оснащения производства с учетом их степени сложности.

Предложен обобщающий показатель степени сложности, который базируется на действующих стандартах и нормативных документах и позволяет проанализировать изделия и технологии с точки зрения рациональности их проектирования, изготовления и применения. Разработана математическая модель сложности объектов и процессов,

которая включает конструктивные, технологические и функциональные характеристики, и основываются на ограничительных перечнях типоразмеров, параметров изделий и техпроцессов с учетом их наибольшей применяемости в производстве.

1.8 Подготовка производства блочно-модульных фрез с использованием 3D прототипирования

В связи с диверсификацией и кастомизацией выпускаемой машиностроительными предприятиями продукции возрастают требования по сокращению временных и финансовых затрат на подготовку производства, поэтому выработка рекомендаций по подготовке производства с использованием 3D прототипирования и изготовлению экспериментальных образцов является актуальной темой исследований. Предлагаются различные организационные формы технологических процессов – типовые, групповые, гибкие и мобильные [52], основанные на принципах унификации, модульности и автоматизации быстроперестраиваемого оборудования и оснастки; учитываются изменения в методологии научных исследований процессов (научная подготовка), связанные с широким использованием электронных средств, искусственного интеллекта и т.п. [2,9,20,23,30,84]. Одним из перспективных направлений совершенствования конструкторской и технологической подготовки производства является применение 3D моделей (макетов) экспериментальных образцов продукции, получаемых послойным синтезом (аддитивные технологии) [28,29,85,86]. Рассмотрим некоторые особенности использования 3D макетирования экспериментальных образцов на примере подготовки производства сборной технологической оснастки – блочно-модульных фрез.

Основная часть. Предлагаемые к производству конструкции сборных режущих инструментов включают блоки и модули, из которых формируются блочно-модульные фрезы (БМФ) различных типов по схеме на рисунке 1.8.1.

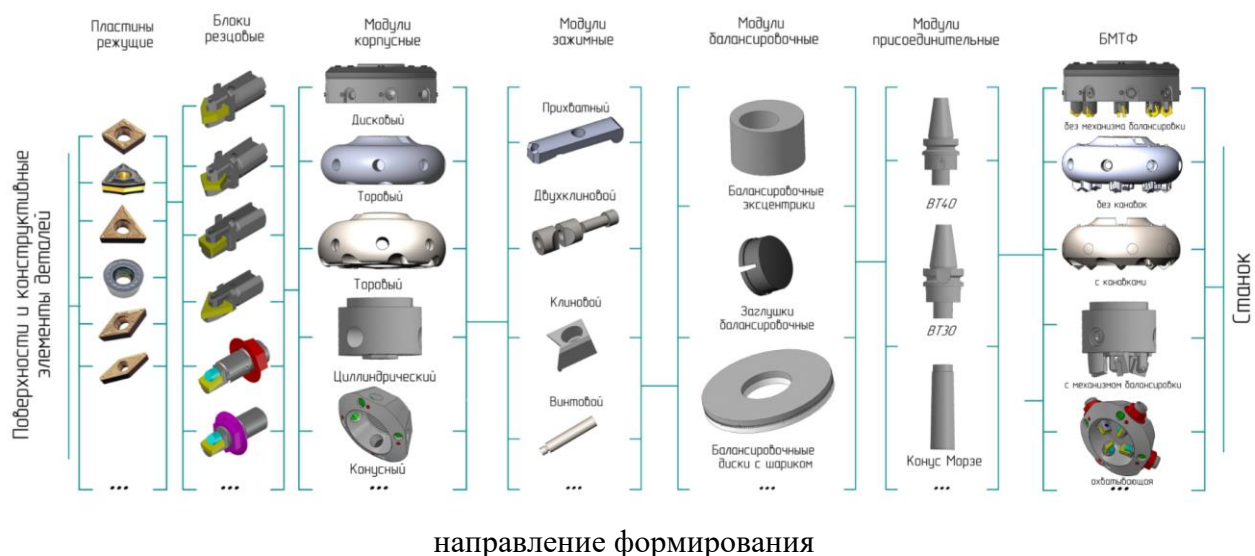


Рисунок 1.8.1 – Схема формирования блочно-модульных фрез

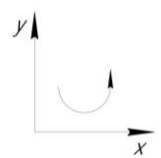
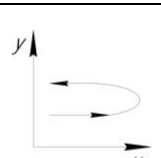
Формирование БМФ предусматривает выбор пластины режущей (ПР) исходя из формы обрабатываемой поверхности и конструктивного элемента детали, свойств материалов, режимов обработки и т.д. ПР устанавливается в блок резцовый (БР), отличительной особенностью которого является [43,87] технологичность присоединительных (базирующих) поверхностей державки – выполняются открытыми, для установки ПР и зажимного элемента в виде клиноприхвата. БР в свою очередь устанавливается в модуль корпусной МК по цилиндрическим (базирующим) поверхностям и зажимается или прихватным, или одно-двухклиновым механизмами. МК может быть снабжен модулем балансировочным (МБ) включающим или эксцентриковые втулки для установки блоков резцовых, или заглушки-грузики, устанавливаемые в корпусном модуле, или балансировочные кольца со спиральными пазами и шариками, а сам МК с помощью модуля присоединительного (МП) в виде державки, оправки, хвостовика и т.п., устанавливается в резцедержателе, шпинделе, палете, инструментальном магазине и т.п. станка. Преимущество предлагаемой системы сборных режущих инструментов по сравнению с аналогами состоит в использовании унифицированного БР, который может быть установлен в различные типы режущих инструментов (токарные, осевые, фрезерные, расточные и т.д.), что обеспечивает сокращение финансовых и временных затрат как на этапе изготовления, так и на этапе эксплуатации режущего инструмента.

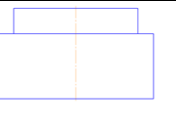
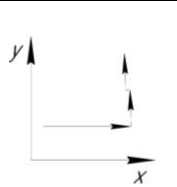
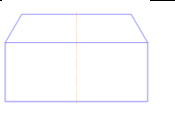
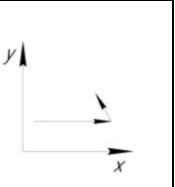

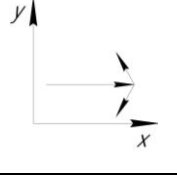
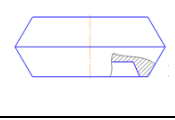
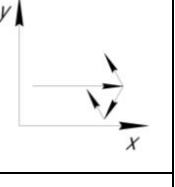
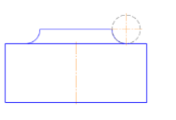
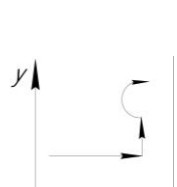
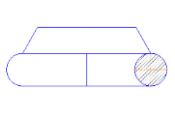
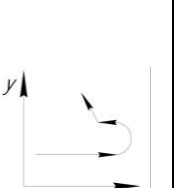
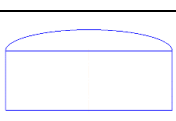
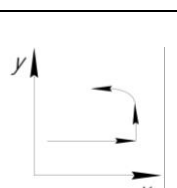
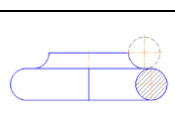
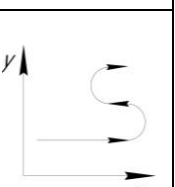
Однако при внедрении в производство этой системы сборных режущих инструментов требуется тщательная отработка конструкций и технологий их изготовления. Поэтому предлагается включать в этапы конструкторской и технологической подготовки производства БМФ макетирование экспериментальных образцов на 3D принтере. Причем на этих этапах могут быть изготовлены конструкции из различных материалов – пластиковых и металлических, а также их комбинации, применены при изготовлении традиционные, субтрактивные, аддитивные и «гибридные» технологии. Была поставлена задача спроектировать и изготовить державки БР и МК различных форм и из различных пластиковых материалов, провести анализ полученных экспериментальных образцов и оценить влияние на полученные размеры образцов усадки материала, и с учетом этого предложить новые конструкции БМФ.

Проведенный анализ конструкций резцовых блоков, картриджей, резцовых вставок и т.д. показал, что используется различная конфигурация корпусов. Присоединительные поверхности и конструктивные элементы блоков резцовых выполняются цилиндрическими, коническими, плоскими, с рифлениями и т.п.; в поперечном сечении могут иметь вид окружностей, некруглых и гранных элементов, овалов, прямоугольников, квадратов, трапеций и т.п.. Исходя из принципа технологичности конструкций резцового блока при его изготовлении и сборке были выбраны цилиндрические присоединительные поверхности державки для установки в модуль корпусной и открытые прямоугольные пазы для установки пластины режущей и модуля зажимного.

Возможные варианты конструкций модулей корпусных предложены в таблице 1.8.1 (столбец 2). Учтены формулы, описывающие формы МК (столбец 3), и направления потоков смазочно-охлаждающей технологической среды (СОТС) при вращении МК (столбец 4). Последовательно рассмотрены варианты исполнения МК от простых форм (№ п/п 1-6 – диск, цилиндр и т.д.), до их комбинации (№ п/п 7-14). При этом учитывались требования, с одной стороны, по функциональному назначению фрез – необходимость эффективного резания и размещения в МК таких конструктивных элементов, как БР, МЗ, МБ, МП, ограничения их габаритных размеров, и выполнения стружко-потокоотводящих канавок технологичными методами, а, с другой стороны, по максимальному обеспечению обтекаемости формы МК смазочно-охлаждающей технологической средой, учитывающей высокую частоту вращения фрез на современных станках с ЧПУ (порядка 10-40 тыс. мин⁻¹). На основании результатов моделирования работы фрез различных форм установлено, что наиболее предпочтительными формами обтекаемости являются формы в виде сочетания двух торовых поверхностей ((№ п/п 14).

Таблица 1.8.1. – Варианты форм корпусов и направлений потоков жидкостей и газов

№ п/п	Форма корпуса	Формула описания формы	Направление потоков при вращении корпуса	№ п/п	Форма корпуса	Формула описания формы	Направление потоков при вращении корпуса
1	диск	$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1$		2	цилиндр	$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1$	
3	конус	$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2} = 0$		4	шар	$x^2 + y^2 + z^2 = r^2$	
5	тор	$(x^2 + y^2 + z^2 + R^2 + r^2)^2 - 4x^2(x^2 + y^2) = 0$		6	эллипсоид	$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2} = 1$	

7		$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1$		8		$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2} = 0$	
	диск + цилиндр				конус + цилиндр		
9		$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2} = 0$		10		$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2} = 0$	
	два конуса				три конуса		
11		$(x^2 + y^2 + z^2 + R^2 + r^2)^2 - 4x^2(x^2 + y^2) = 0$		12		$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2} = 0$	
	тор + цилиндр				тор и конус		
13		$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2} = 1$		14		$(x^2 + y^2 + z^2 + R^2 + r^2)^2 - 4x^2(x^2 + y^2) = 0$	
	эллипсоид + цилиндр				два тора		

Для отработки конструкций фрез и технологий их изготовления были отпечатаны макеты корпусов в виде сочетания цилиндров, дисков, усеченных конусов и сопрягаемых торов (рисунок 1.8.2).

а)



б)



в)



Рисунок 1.8.2 – Макеты корпусов БМФ в виде сочетания диска, усеченного конуса и цилиндра (а и б), сопрягаемых торов (в)

Исследование макетов БМФ на этапе научной подготовки производства позволяют оценить эргономические и аэродинамические свойства фрез; определить преимущества и недостатки технологии сборки; трудоемкость конструкторской и технологической подготовки производства традиционными, «гибридными» методами и с использованием 3D печати. Структурная схема выбора методов изготовления БМФ представлена на рисунке 1.8.3.

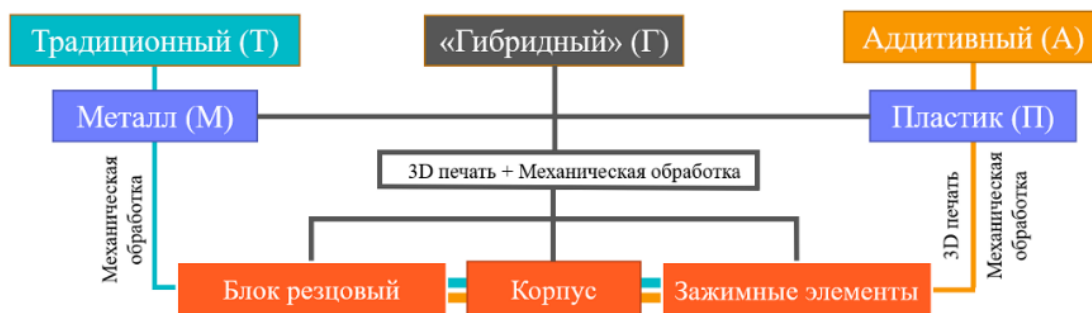


Рисунок 1.8.3 – Структурная схема выбора методов изготовления БМФ

Эта схема включает выбор методов: традиционного (Т), заключающегося в механической обработке металла, аддитивного (А) – 3D печати из пластикового материала с последующей пост-обработкой. Сочетание (Т) и (А) методов обеспечивает изготовление фрез «гибридным» (Г) методом, при котором учитывается не только функциональное назначение конструкций фрез, но и возможность взаимозаменяемости материалов конструктивных элементов в различных комбинациях, например, пластиковый корпус и металлические блоки резцовые. Данная схема отражает вариативность принятия инженерных решений на этапах конструкторской и технологической подготовки производства. Использование традиционных методов в единичном и мелкосерийном производствах приводит к увеличению стоимости подготовки производства. Когда же изделия печатаются на 3D принтере, практически нет разницы в стоимости его единицы – то есть не важно требуются 1-3 или 100 ед., поскольку нет затрат на инструменты, приспособления и т.д.

Были отпечатаны макеты блоков резцовых из различных пластиковых материалов (рисунок 1.8.4), свойства которых изучались применительно к эксплуатации вращающихся режущих инструментов. 3D печать блоков резцовых позволяет осуществить быстрый переход от экспериментальных к опытным образцам изделия.

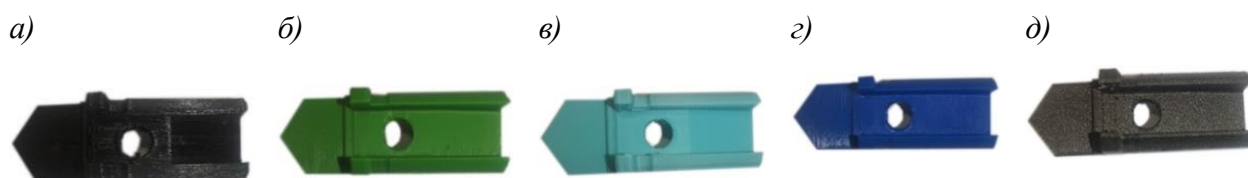


Рисунок 1.8.4 – Внешний вид державки блока резцового из различных марок пластиковых материалов: а) – ABS-GF; б) – ABS; в) – PLA; г) – SBS; д) – Pet

Технологический маршрут изготовления БМФ может быть составлен в целом на изделие, его конструктивные элементы (сборочные единицы), на «гибридную» конструкцию, включающую или конструктивные элементы из различных материалов, или

субтрактивные и аддитивные операции изготовления отдельных конструктивных элементов, которые затем собираются традиционными технологическими методами.

Например, для единичного и мелкосерийного типов производства технологический маршрут на отдельные конструктивные элементы БМФ из пластиковых материалов включает операции: 1) подготовка к 3D печати; 2) 3D печать деталей; 3) постобработка.

Процесс подготовки к 3D печати включает следующие этапы настройки программного продукта в Simplify 3D:

1) присваивается имя процесса, степень заполнения объекта и обновляется профиль настроек;

2) назначается диаметр сопла принтера, коэффициент величины экструзии, а также ее ширина; задается величина подъема сопла над печатающимся объектом;

3) в группе настроек «слой» задается высота слоя печати (как правило, величина равная 1/2 диаметра сопла), количество внешних сплошных слоев и внешних параметров; выбирается привязка стартовых точек начала печати к вымышленной точке с координатами «X» и «Y»;

4) выбирается тип (форма) внутреннего заполнения модели (линии, треугольники, сетка, волны, сотовое заполнение); а также настройка материала поддержки, который помогает напечатать нависающие элементы модели;

5) настраивается температура печати, стола;

6) настраивается скорость и система охлаждения модели при печати;

7) расширенные настройки высоты начала и окончания процесса, настройки поведения слайсера при обработке моделей содержащих ошибки, настройки печати тонких стенок.

На операции 3D печати деталей осуществляется следующая последовательность переходов:

1) передать 3D модель прототипа в формате STL в программное обеспечение 3D принтера;

2) расположить модель в виртуальной рабочей зоне;

3) сгенерировать элементы вспомогательных конструкций (из специального материала поддержки);

4) произвести расчёт путей перемещения печатной головки;

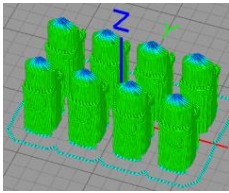
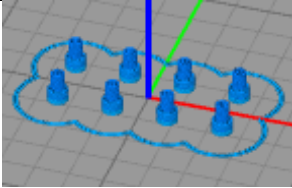
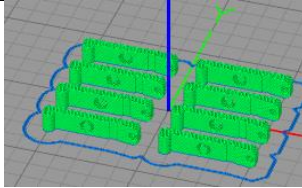
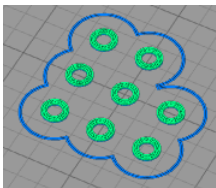
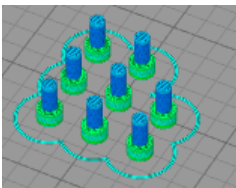
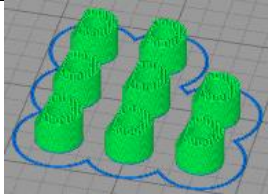
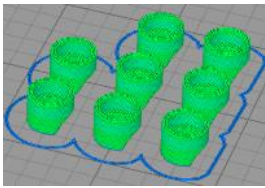
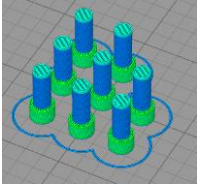
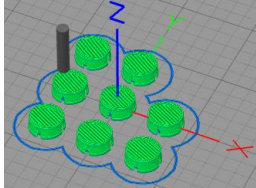
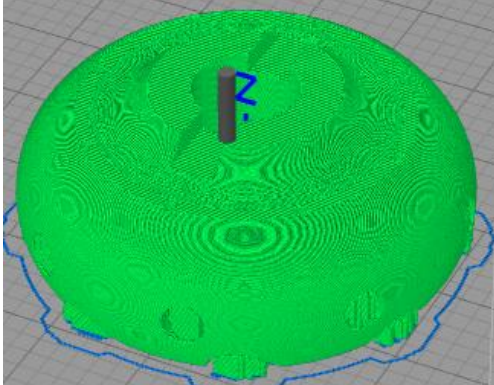
5) произвести расчёт времени выращивания прототипа;

6) разогреть стол до температуры 60-120 градусов;

7) печатать изделие, выдерживая температуру экструдера 210-285 градусов, скорость перемещения сопла – 40 мм/с, согласно исходной 3D модели;

8) убрать вспомогательные конструкции. Основные характеристики 3D печати деталей БМФ представлены в таблице 1.8.2.

Таблица 1.8.2. – Основные характеристики 3D печати деталей БМФ

Деталь	Характеристики 3D печати	Деталь	Характеристики 3D печати	Деталь	Характеристики 3D печати
Державка	 Время печати: 85 мин.; Длина нити: 5108 мм; Количество материала: 15,4 г	Штифт	 Время печати: 4 мин.; Длина нити: 65,9 мм; Количество материала: 0,2 г	Прихват	 Время печати: 18 мин.; Длина нити: 1052,9 мм; Количество материала: 3,7 г
Шайба	 Время печати: 1 мин.; Длина нити: 70 мм; Количество материала: 0,21 г	Винт блока резцового	 Время печати: 11 мин.; Длина нити: 370,8 мм; Количество материала: 1,1 г	Сухарь резьбовой	 Время печати: 21 мин.; Длина нити: 1511 мм; Количество материала: 4,6 г
Сухарь упорный	 Время печати: 17 мин.; Длина нити: 1052,2 мм; Количество материала: 4 г	Винт зажимного модуля	 Время печати: 24 мин.; Длина нити: 1321,0 мм; Количество материала: 4 г	Балансировочная заглушка	 Время печати: 14 мин.; Длина нити: 788 мм; Количество материала: 2,4 г
Корпусной модуль		Время печати: 958 мин.; Длина нити: 138377 мм; Количество материала: 417 г			

Как следует из таблицы 1.8.2, основное время печати всех элементов БМФ составляет – 19 ч. 22 мин. (1153 мин); длина пластиковой нити – 149716,4 мм (149,7 м.); количество материала печати – 452,61 г (0,45261 кг.). Основные затраты печати

пластиковых деталей БМФ при стоимости 1 г материала ≈ 10 копеек составляет порядка $\approx 45,3$ бел. руб..

Технологическая схема сборки напечатанных конструктивных элементов БМФ включает следующие операции (рисунок 1.8.5): 005 Комплектовочная; 010 Сборочная «Блока резового»; 015 Сборочная «Зажимного модуля»; 020 Сборочная «БМФ».

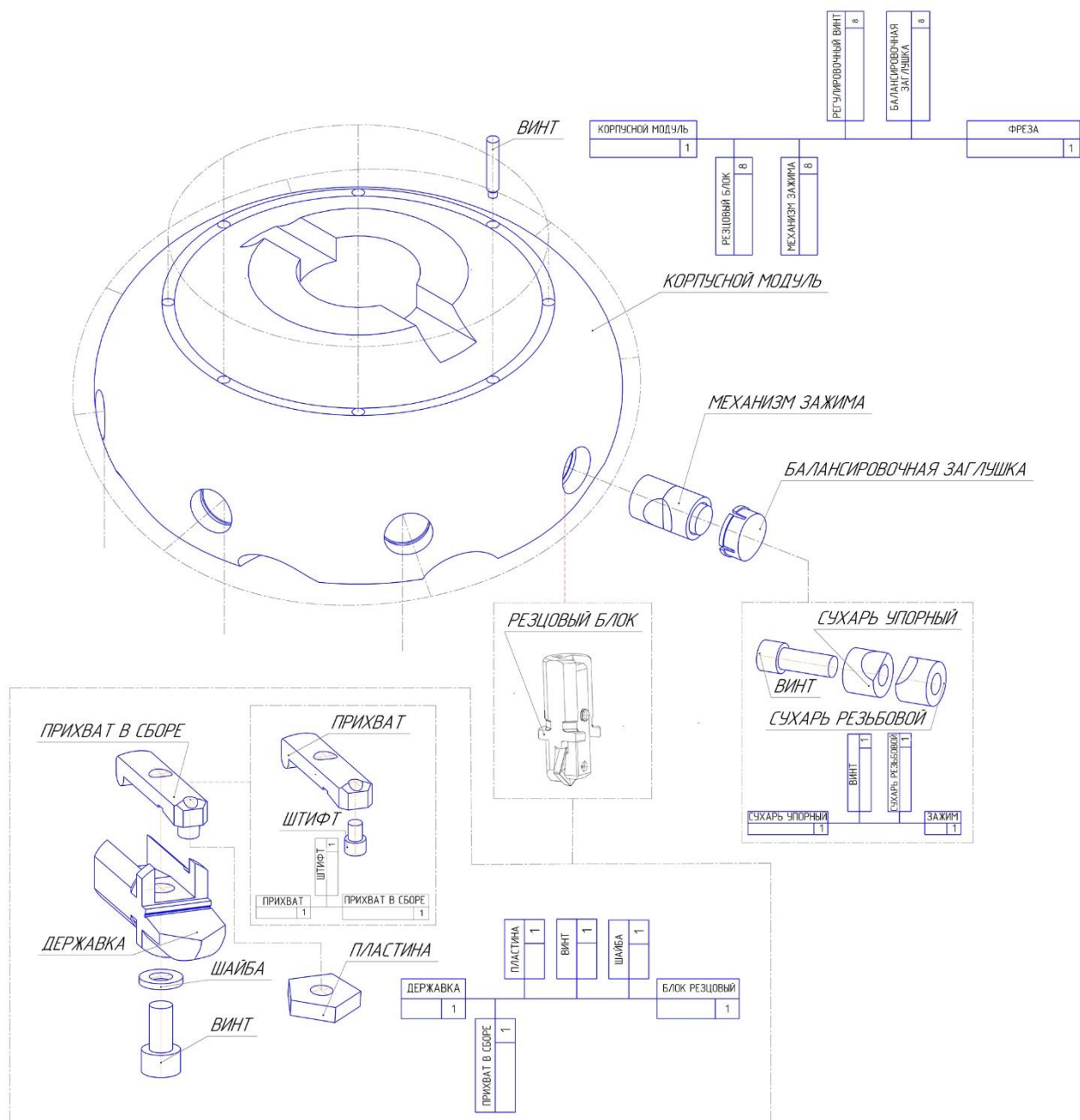


Рисунок 1.8.5 – Технологическая схема сборки БМФ

Последовательность сборки БМФ: 1) Процесс сборки БР начинается со сборки прихвата и штифта с образованием прихвата в сборе; в отверстии прихвата позиционируется штифт с предварительно установленной режущей пластиной, ограничивая перемещение

штифта вдоль посадочной поверхности. Полученная сборочная единица устанавливается в пазу державки по посадке и закрепляется с помощью винта с шайбой, обеспечивая прижим основания и боковой поверхности пластины к установочной и направляющей поверхностям державки; 2) Сборка БМФ начинается со вставки механизма зажима (сборочная единица: сухарь упорный и резьбовой с винтом) в соответствующие отверстия МК, с предварительно поджатым винтом. Затем последовательно вставляются БР в базирующие отверстия МК с ориентацией пластин режущих на заданный угол наклона режущей кромки, осуществляется настройка радиального и торцового биения БР с помощью регулировочных винтов и поворота БР вокруг собственной оси и окончательно закрепляется БР механизмом зажима; 3) Заключительным этапом сборки является установка балансирующих заглушек.

Этап сборки изделия обеспечивает выявление погрешностей изготовления отдельных конструктивных элементов, соответствия их точности и качества заданным параметрам на чертежах деталей. При этом такие особенности 3D печати деталей, как например, тепловая усадка материала, структура и шероховатость получаемых поверхностей позволяют отработать на экспериментальных образцах исполнение отдельных конструктивных элементов и скорректировать чертеж 3D модели. Поэтому были проведены исследования точностных параметров экспериментальных образцов блоков резовых и модулей корпусных БМФ.

Точность линейных размеров 3D-модели и соответствие их чертежу обеспечивается, в первую очередь, настройкой программного приложения Simplify 3D для последующей печати на 3D принтере. Наиболее важные параметры настройки, как отмечено выше, относятся к экструдеру, формированию и заполнению слоев материала, температуре и охлаждению при печати.

Оценка соответствия параметров точности размеров макетов БМФ заданным на чертеже размерам осуществлялась с использованием видеоизмерительного микроскопа модели NVM-4030D фирмы NORGAU на примере 10 державок блока резового и 2 корпусных модуля из различных пластиковых материалов. На рисунке 1.8.6 представлены эскизы державки и корпуса с обозначением позиций линейных и угловых размеров.

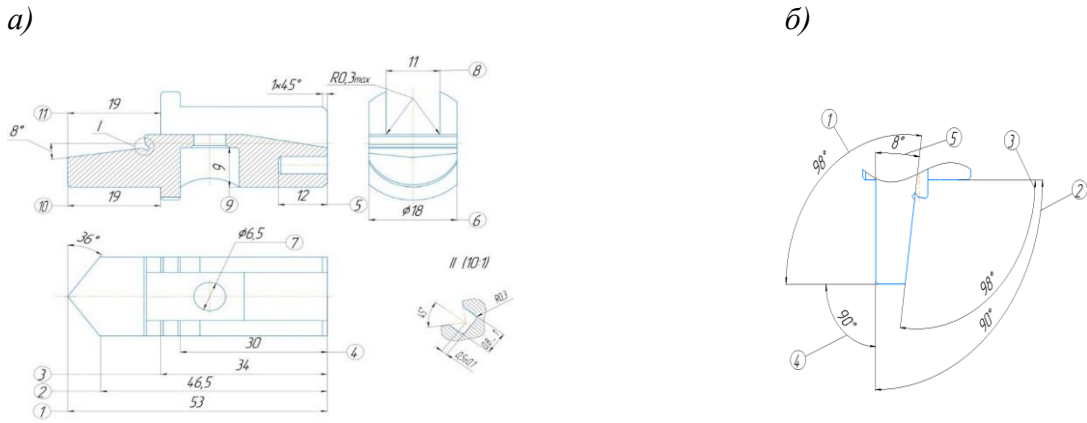


Рисунок 1.8.6 – Эскиз измерения линейных (а) и угловых (б) размеров державки

Указанные на чертеже позиции от 1 до 11 соответствуют последовательности измерения линейных размеров модели «Державка» блока резового из разных пластиковых материалов. Полученные результаты измерений линейных размеров представлены в таблице 1.8.3.

Таблица 1.8.3. – Линейные размеры модели «Державка» блока резового

Позиция		Материал																			
		PA-GF		PLA		FLEX		PET		PETG		PC		ABS		TPU-GF		SBS		ABS-GF	
		MM	MM	MM	MM	MM	MM	MM	MM	MM	MM	MM	MM	MM	MM	MM	MM	MM	MM	MM	MM
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10											
1	1	53,2	52,8	53,7	53,2	52,9	52,8	52,5	52,3	53,1	52,8	52,5	52,3	53,1	52,8	52,9	53,1	52,8	52,8	52,8	
	2	53,2	52,9	53,6	53,2	53,0	52,7	52,5	52,1	53,1	52,7	52,5	52,1	53,1	52,9	53,0	52,9	53,1	52,8	52,8	
	3	53,3	52,9	53,8	53,1	52,9	52,6	52,6	52,3	53,1	52,6	52,6	52,3	53,1	52,9	53,0	52,9	53,1	52,8	52,8	
2	1	47,1	46,6	47,4	46,9	46,7	46,9	46,6	46,4	46,8	46,9	46,6	46,4	46,8	46,4	46,6	46,5	46,4	46,8	46,4	
	2	47,0	46,6	47,4	46,8	46,8	47,0	46,6	46,5	46,8	47,0	46,6	46,5	46,8	46,5	46,6	46,5	46,8	46,3	46,3	
	3	47,0	47,6	47,3	46,7	46,8	46,9	46,7	46,4	46,7	46,9	46,7	46,4	46,7	46,4	46,6	46,4	46,7	46,4	46,4	
3	1	34,1	33,9	34,6	34,3	34,0	34,1	34,0	33,5	34,3	34,1	34,0	33,5	34,3	34,0	33,9	33,5	34,2	33,9	33,9	
	2	34,0	33,9	34,7	34,1	34,1	34,2	34,1	33,9	34,2	34,1	33,9	33,6	34,2	33,9	33,9	33,5	34,2	33,9	33,9	
	3	34,0	34,0	34,7	34,4	33,8	34,1	33,9	33,5	34,2	34,1	33,9	33,5	34,2	33,9	33,9	33,5	34,2	33,9	33,9	
4	1	29,7	29,7	30,0	29,9	29,8	29,8	29,6	29,4	29,8	29,8	29,6	29,4	29,8	29,7	29,7	29,3	29,7	29,7	29,8	
	2	29,8	29,7	30,1	29,7	29,8	29,8	29,7	29,8	29,8	29,8	29,7	29,3	29,8	29,7	29,7	29,3	29,7	29,7	29,9	
	3	29,8	29,8	30,0	29,9	29,7	29,8	29,7	29,8	29,8	29,8	29,7	29,3	29,8	29,7	29,7	29,3	29,7	29,7	29,9	
5	1	12,9	12,4	12,1	12,5	12,0	12,2	12,2	12,2	12,1	12,2	12,2	12,2	12,1	12,2	12,0	12,2	12,1	12,1	12,1	
	2	12,7	12,3	12,3	12,4	12,1	12,3	12,1	12,3	12,1	12,3	12,1	12,4	12,0	12,2	12,0	12,4	12,0	12,2	12,2	
	3	12,8	12,3	12,1	12,4	12,1	12,3	12,1	12,3	12,1	12,3	12,1	12,1	12,1	12,2	12,0	12,1	12,0	12,2	12,2	
6	1	17,8	18,4	18,4	18,0	18,3	17,7	18,1	17,4	17,9	17,8	18,1	17,4	17,9	18,3	18,0	17,3	17,9	18,3	18,3	
	2	17,7	18,5	18,5	17,8	18,2	17,8	18,0	17,2	18,0	17,9	18,0	17,2	18,0	18,4	18,0	17,2	18,0	18,4	18,4	
	3	17,9	18,4	18,4	17,9	18,4	17,7	18,1	17,3	18,0	17,9	18,1	17,3	18,0	18,2	18,0	17,3	18,0	18,2	18,2	
7	1	6,4	6,2	6,3	6,5	6,8	6,8	6,4	6,8	6,5	6,4	6,8	6,4	6,5	6,6	6,5	6,4	6,5	6,7	6,6	
	2	6,7	6,0	6,4	6,5	6,6	6,7	6,5	6,9	6,4	6,7	6,5	6,9	6,4	6,7	6,5	6,4	6,5	6,7	6,7	
	3	6,4	6,1	6,3	6,4	6,8	6,7	6,7	6,4	6,9	6,7	6,7	6,4	6,9	6,5	6,5	6,4	6,5	6,7	6,7	
8	1	10,7	10,4	10,7	10,7	10,7	10,8	10,8	10,9	10,5	10,8	10,8	10,9	10,8	10,5	10,8	10,7	10,9	10,5	10,5	
	2	10,8	10,3	10,8	10,8	10,7	10,9	10,7	10,9	10,8	10,8	10,8	10,9	10,8	10,5	10,8	10,7	10,9	10,5	10,5	
	3	10,7	10,3	10,9	10,8	10,7	10,8	10,7	10,7	10,8	10,8	10,8	10,6	10,9	10,5	10,8	10,7	10,9	10,5	10,5	
9	1	8,8	8,7	8,5	8,8	9,4	8,9	8,8	8,9	8,8	8,9	8,8	8,9	9,1	8,8	8,8	9,0	8,8	8,8	8,8	
	2	9,0	8,8	8,8	8,8	8,7	8,9	8,7	8,9	8,8	8,9	8,7	8,9	9,1	8,8	8,8	9,0	8,8	8,8	8,8	
	3	8,9	8,7	8,8	8,8	9,0	8,7	8,9	8,7	8,9	8,8	8,7	8,9	9,0	8,8	8,8	9,0	8,8	8,8	8,8	
10	1	19,2	18,4	18,8	18,8	18,6	18,6	18,7	18,6	18,7	18,6	18,7	19,0	18,7	18,5	18,8	18,8	18,7	18,5	18,5	
	2	18,9	18,6	18,6	18,6	18,7	18,6	18,8	18,8	18,8	18,8	18,7	18,8	18,8	18,8	18,8	18,8	18,8	18,8	18,8	
	3	19,1	18,6	18,6	18,6	18,7	18,6	18,7	18,7	18,7	18,7	18,7	18,7	18,8	18,8	18,8	18,8	18,8	18,8	18,8	
11	1	19,1	19,4	18,1	18,1	18,8	18,8	18,8	19,1	18,8	18,8	19,1	19,1	18,6	18,9	18,8	19,1	18,6	18,9	18,9	
	2	19,2	19,1	17,8	17,8	18,4	18,4	18,7	19,2	18,7	18,7	19,2	18,9	18,7	18,9	18,8	19,1	18,7	18,7	18,7	
	3	19,0	18,8	17,9	17,9	18,8	18,8	18,8	18,9	18,8	18,8	18,9	19,1	18,5	18,5	18,5	18,5	18,5	18,5	19,0	

Анализ полученных результатов, фрагменты которых представлены в виде графиков отклонений линейных размеров от номинальных для различных материалов показаны на рисунке 1.8.7, позволяет сделать выводы о том, что степень усадки минимальна для пластикового материала марки SBS – отклонение линейных и угловых

размеров не превышают соответственно 0,64 и 0,15%, максимальные отклонения установлены для пластика марки ABS-GF.

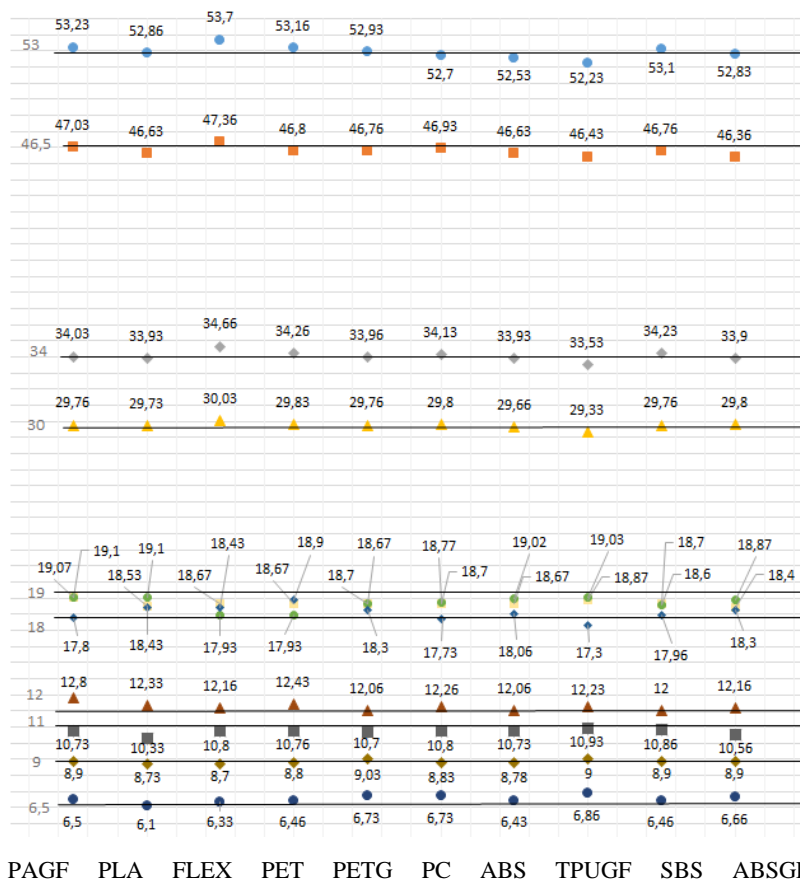


Рисунок 1.8.7 – График отклонений линейных размеров изделия от номинальных значений (сплошная линия) для различных пластиковых материалов

Значения погрешностей линейных размеров для каждой марки материалов, представлены в таблице 1.8.4.

Таблица 1.8.4. – Значения погрешностей линейных размеров

Номер линейного размеров	Марки материала									
	PA-GF	PLA	FLEX	PET	PETG	PC	ABS	TPU-GF	SBS	ABS-GF
1	0,4340	0,2642	1,3208	0,3019	0,1321	0,5660	0,8868	1,4528	0,1887	0,3208
2	1,1398	0,2796	1,8495	0,6452	0,5591	0,9247	0,2796	0,1505	0,5591	0,3011
3	0,0882	0,2059	1,9412	0,7647	0,1176	0,3824	0,2059	1,3824	0,6765	0,2941
4	0,8000	0,9000	0,1000	0,5667	0,8000	0,6667	1,1333	2,2333	0,8000	0,6667
5	6,6667	2,7500	1,3333	3,5833	0,5000	2,1667	0,5000	1,9167	0,0000	1,3333
6	1,1111	2,3889	2,3889	0,5556	1,6667	1,5000	0,3333	3,8889	0,2222	1,6667
7	0,0000	6,1538	2,6154	0,6154	3,5385	3,5385	1,0769	5,5385	0,6154	2,4615
8	2,4545	6,0909	1,8182	2,1818	2,7273	1,8182	2,4545	0,6364	1,2727	4,0000
9	1,1111	2,9630	3,3333	2,2222	0,3704	1,8519	2,4691	0,0000	1,1111	1,1111
10	0,3509	2,4561	1,7544	1,7544	1,5789	1,5789	1,7544	0,7018	1,5789	3,1579
11	0,5263	0,5263	5,6140	5,6140	1,7544	1,2281	0,1170	0,1754	2,1053	0,7018

Исходя из полученных результатов измерений значений угловых и линейных размеров напечатанных моделей «Державка» блока резцового и модуля корпусного следует, что наилучшими для изготовления модели являются пластиковые материалы марок SBS и PLA, обеспечивающие наименьшее искажение размеров.

Наблюдается увеличение размера 5 и уменьшение размеров 10 и 11, что связано с влиянием материала поддержки на печать буртика и резьбового отверстия державки. Наружные нависающие элементы трехмерной модели «Державка» блока резцового в виде «буртиков» (позиция измерений №4 – 30мм) получают в пределах $29,3 \div 29,8$ мм в зависимости от вида пластика, то есть в «минусе», что на $0,7 \div 0,2$ мм отличаются от номинального, и объясняется наличием поддерживающего материала под нависающим элементом. При этом отверстие, расположенное внутри модели, получается с минимальным отклонением от геометрической точности согласно чертежу. При анализе измерений корпусов БМФ отклонений размеров макетов от заданных на чертеже не отмечалось.

Выводы. 1. Предложены структурные схемы формирования БМФ и выбора метода их изготовления, отличительными особенностями которых является применение унифицированных конструкций блоков резцовых и корпусных модулей, субтрактивных, аддитивных и «гибридных» технологий, что обеспечивает использование рационального варианта исполнения сборного режущего инструмента, учитывающего условия обработки разнообразных поверхностей и конструктивных элементов деталей на станках с ЧПУ;

2. Разработаны конструкции блоков резцовых, модулей корпусных и балансировочных, отличающегося оригинальными механизмами закрепления пластин режущих и статической балансировки, обтекаемыми формами поверхностей конструктивных элементов, что обеспечивает повышение надежности и точности БМФ в процессе резания;

3. Разработаны технологические маршруты изготовления фрез, включающие подготовку к 3D печати, 3D печать и постобработку, подробное описание операции 3D печати, а также технологическую схему сборки БМФ, что позволяет рекомендовать аддитивную технологию для получения экспериментальных образцов сборных режущих инструментов на этапе подготовки серийного производства;

4. Полученные результаты экспериментальных исследований влияния усадки пластиковых материалов различных марок на линейные и угловые размеры деталей БМФ, включающие оценку отклонений от номинальных значений и погрешностей относительно размеров, заданных на чертежах деталей, позволили рекомендовать для изготовления экспериментальных образцов БМФ пластиковые материалы марок SBS и PLA.

2 ФУНКЦИОНАЛЬНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ КИНЕМАТИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ МЕТАЛЛОРЕЖУЩИХ СТАНКОВ С ЭЛЕКТРОННЫМИ СВЯЗЯМИ В ФОРМООБРАЗУЮЩИХ ГРУППАХ

2.1 Постановка задачи

Согласно современной научной парадигме [88], определяющую роль при синтезе кинематической структуры станка играют группы формообразования, воспроизводящие образующую и направляющую реальных поверхностей. В зависимости от характеристического образа инструмента и класса воспроизведения образующей и направляющей формообразующие группы делятся на два вида. Первый вид составляют простые, или элементарные формообразующие группы. В таких группах траектория вращательного или поступательного формообразующего движения не настраивается, а ее вид задается непосредственно соответствующей элементарной вращательной или поступательной кинематической парой. Вторым видом являются сложные формообразующие группы, воспроизводящие сложное двухэлементарное или трехэлементарное формообразующее движение, имитирующее более сложный механизм, например передачу винт-гайка, зубчатую передачу, червячную передачу, зубчато-реечную передачу. В таких группах траектория формообразующего движения настраивается соответствующим механизмом, например гитарой сменных зубчатых колес, с точностью до 5 – 7 знаков после запятой.

Современная научная парадигма разрабатывалась на основе кинематического анализа станочного оборудования с механическими связями. Создание мехатронных технических систем, в том числе металлорежущих станков с ЧПУ, привело к созданию сложных гибридных формообразующих групп, структура которых представляет собой объединение механических и электронных связей на основе типовых интегральных схем. Поэтому представляется целесообразным с позиций современной парадигмы рассмотреть функциональное проектирование в методике создания и познания станочного оборудования с ЧПУ.

Анализ патентных источников показывает, что в сложных гибридных формообразующих группах, воспроизводящих станочное зацепление, имитирующее конкретную передачу, функциональная связь исполнительных органов группы осуществляется, как правило, отслеживающей синхронизацией по схеме задающая – ведомая координаты и по схеме равнозначных координат. Обязательным условием при этом является использование для каждого исполнительного органа отдельного механического источника энергии движения, например, регулируемого электродвигателя.

2.2 Синтез гибридной кинематической структуры станка по схеме задающая – ведомая координаты

Функциональное проектирование мехатронной технической системы, функционирующей по схеме задающая – ведомая координаты, рассмотрим на примере частной структурной схемы резьбонарезного станка.

Классический способ нарезания резьбы резцом, у которого характеристический образ соответствует профилю нарезаемой резьбы, рассмотрен в разделе. По этому способу заготовке, определенным образом ориентированной в пространстве, сообщают вращательное движение B_1 , а фасонному (профильному) резцу, - поступательное движение Π_2 , функционально связанное с движением B_1 заготовки. Класс образования резьбы копирование – след ($E - H^C$). Причем сложное исполнительное движение $\Phi_v(B_1\Pi_2)$, состоящее из двух согласованных между собой элементарных движения: вращательного B_1 и поступательного Π_2 воспроизводит направляющую (винтовую линию) обрабатываемой поверхности. Следовательно, частная винторезная структура станка должна осуществлять только одно сложное формообразующее движение, состоящее из двух функционально связанных элементарных вращательного и поступательного движений.

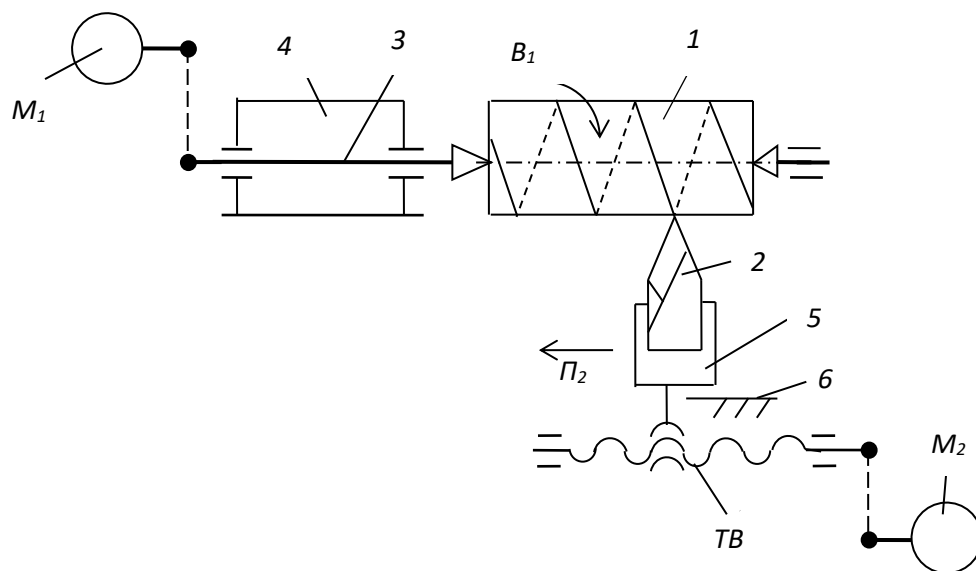


Рисунок 2.2.1 – Исполнительные органы гибридной структурной схемы резьбонарезного станка

На рисунке 2.2.1 представлены исполнительные органы проектируемого станка. Исполнительный орган, несущий заготовку 1 представляет собой шпиндель 3 (задающая координата), смонтированный с возможностью вращения B_1 в стационарном блоке 4, называемом передней бабкой. Исполнительный орган, несущий резец 2 – это подвижный блок 5, называемый продольным суппортом или кареткой (ведомая координата), смонтированным с возможностью поступательного перемещения Π_2 по направляющим 6 параллельно линии центров станка. Поступательное перемещение суппорта обеспечивается посредством тягового вала (ТВ). В токарно-винторезных станках с ЧПУ в качестве тягового вала используется передача винт – гайка с телами качения. Каждый исполнительный орган оснащен отдельным регулируемым электродвигателем.

Для воспроизведения сложного формообразующего движения $\Phi_v(B_1\Pi_2)$,

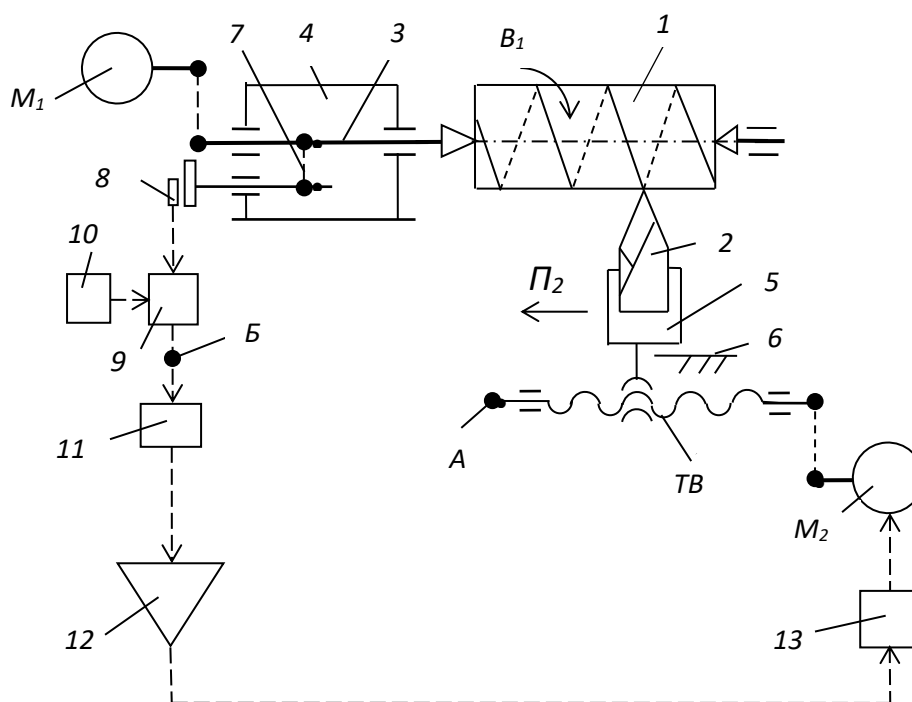


Рисунок.2.2.2 – Гибридная структура резбонарезного станка с системой синхронизации по схеме задающая – ведомая координаты

воспроизводящего направляющую – винтовую линию нарезаемой резьбы (рисунок 2.2.2) соединим шпиндель 3, несущий заготовку, с тяговым валом ТВ суппорта 5, несущего резец 2. Для этого соединим шпиндель 3 (задающая координата) посредством механической передачи 7 с импульсным измерительным преобразователем 8. Выход этого преобразователя соединим с входом управляемого делителя частоты, выполненного в виде счетчика импульсов 9 и блока задания коэффициента деления 10. Выход счетчика 9

делителя частоты соединим с входом импульсно-аналогового преобразователя 11. Выход этого преобразователя соединим через предварительный усилитель 12 и усилитель мощности 13 с электродвигателем M_2 , кинематически связанным с тяговым валом TB привода суппорта 5 (ведомая координата). Ведущую координату – шпиндель 3 кинематически соединим с электродвигателем M_1 .

Запишем связи, проектируемой гибридной структурной схемы на языке символов. Внутренняя связь – мехатронная цепь, включающая механические передачи и типовые интегральные схемы:

$$B_1 \leftarrow 3 \leftarrow 7 \rightarrow (\text{синхронная следящая система: } 8 \rightarrow 9 \rightarrow 11 \rightarrow \\ \rightarrow 12 \rightarrow 13) M_2 \rightarrow TB \rightarrow 5 \rightarrow P_2.$$

Внешняя связь:

$$M_1 \rightarrow 3 \rightarrow 7 (\text{звено соединения связей}).$$

Принципиальной особенностью данной гибридной схемы является размещение электродвигателя M_2 ведомой координаты во внутренней связи формообразующей группы. Поэтому в качестве этого электродвигателя необходимо использовать высокомоментную машину постоянного тока или синхронную машину переменного тока. В качестве электродвигателя M_1 можно использовать менее дорогую традиционную асинхронную машину переменного тока.

Движение $\Phi_v(B_1P_2)$ имеет незамкнутую траекторию и настраивается по всем пяти параметрам: на траекторию – делителем частоты; на скорость – посредством задания величины напряжения при использовании электродвигателя постоянного тока или частоты переменного тока при использовании электродвигателя переменного тока; на направление, исходное положение и путь – программно на программоносителе или непосредственно на дисплее устройства ЧПУ в соответствующем коде.

Делитель частоты (счетчик 9 – блок установки коэффициента деления 10) является аналогом механического органа настройки на траекторию (например, гитары сменных зубчатых колес). Поэтому коэффициент деления определим по методике определения передаточного отношения механического органа настройки на траекторию. Следовательно, РП для коэффициента деления имеют вид:

$$1 \text{ оборот заготовки } (B_1) \rightarrow P \text{ мм перемещения инструмента } (P_2).$$

Тогда, УКЦ:

$$P = I \cdot k_d \cdot i_0 \cdot P_{TB},$$

где k_d – коэффициент деления; P – шаг нарезаемой резьбы; i_0 – передаточное отношение передачи, связывающей электродвигатель M_2 с тяговым валом; P_{TB} – шаг тягового вала.

Откуда ФН:

$$k_d = P / (i_0 P_{TB}).$$

При включении управляемого электродвигателя M_1 ведущая координата - шпиндель 3 получает движение B_1 с круговой частотой, соответствующей скорости резания. Вращательное движение шпинделя непрерывно преобразуется в импульсном измерительном преобразователе 8 в высокочастотный импульсный сигнал, пропорциональный круговой частоте движения B_1 . Этот сигнал поступает в счетчик 9 делителя частоты, где происходит его деление в соответствии с заданным на блоке 10 коэффициентом деления. Импульсный сигнал с выхода делителя частоты преобразуется в импульсно-аналоговом преобразователе 11 в напряжение, пропорциональное частоте входного сигнала, и с его выхода через предварительный усилитель 12 поступает на усилитель мощности 13. С выхода этого усилителя задающий сигнал поступает на управляемый электродвигатель M_2 , который посредством тягового вала TB сообщает движение Π_2 ведомой координате - суппорту 5, несущему резец. В результате такого прохождения сигнала от ведущей координаты к ведомой координате обеспечивается воспроизведение винтовой линии резьбовой поверхности сложным двухэлементарным движением $\Phi_v(B_1\Pi_2)$.

Полученная в результате функционального проектирования мехатронная структурная схема используется преимущественно в качестве частной резьбонарезной кинематической структуры в универсальных токарно-винторезных станках с ЧПУ.

При функционировании полученной структурной схемы девиация механики ведомой координаты (электродвигатель M_2 – тяговый вал TB – суппорт 5) проецируется на воспроизводимую винтовую поверхность. Это явление, снижающее качественные показатели резьбы, можно устранить посредством адаптивной двухсторонней коррекции задающего сигнала ведомой координаты. Для этого используем блок формирователя сигнала коррекции (рисунок 2.2.2). Этот блок [89] содержит знаковый 1 и фазовый 2 дискриминаторы. Выход знакового дискриминатора 1 соединен с управляющим входом ключа 3, управляемого отрицательным потенциалом, и с управляющим входом ключа 4, управляемого положительным потенциалом. Выход фазового дискриминатора 2 соединен посредством импульсно-аналогового преобразователя 5 с аналоговыми входами ключей 3 и 4. Выход ключа 3 соединен со вторым входом сложения параллельного сумматора 6, а выход ключа 4 – с входом вычитания этого сумматора.

Первые входы обоих дискриминаторов соединим с разъемом B (см. рисунок 2.2.2). Вторые входы дискриминаторов соединим с импульсным измерительным преобразователем, который установим на тяговом валу TB (см. рисунок 2.2.2, позиция A). Из структурной схемы (см. рисунок 2.2.2) исключим предварительный усилитель 12, а

выход импульсно-аналогового преобразователя 11 соединим с первым входом сложения параллельного сумматора 6 формирователя сигнала коррекции. Выход параллельного сумматора соединим с усилителем мощности 13.

Двухсторонняя коррекция задающего сигнала, действующего на выходе параллельного сумматора 6, осуществляется следующим образом. На первых входах знакового 1 и фазового 2 дискриминаторов постоянно действует задающий импульсный сигнал с выхода счетчика 9 делителя частоты. На вторые входы обоих дискриминаторов непрерывно с импульсно-аналогового преобразователя, устанавливаемого на тяговом валу, поступает импульсный сигнал – аналог скорости движения P_2 суппорта 5 (см. рисунок 2.2.2, позиция А). В результате сравнения сигналов на выходе знакового дискриминатора 1 образуется отрицательный потенциал при отставании ведомой координаты от заданного значения и положительный потенциал при его опережении. Этот потенциал поступает на управляющие входы ключей 3 и 4. Одновременно на выходе фазового дискриминатора 2 образуется сигнал абсолютной погрешности, который после преобразования в аналоговую форму в импульсно-аналоговом преобразователе 5 поступает на аналоговые входы ключей 3 и 4. Этот сигнал поступает на параллельный сумматор 6 через один из ключей в зависимости от знака управляющего воздействия. При отставании ведомой координаты сигнал абсолютной погрешности поступает через ключ 3, управляемый отрицательным потенциалом, на второй вход сложения параллельного сумматора 6, а при опережении этот сигнал поступает через ключ 4, управляемый положительным потенциалом, на вход вычитания этого сумматора. В итоге в параллельном сумматоре 6 происходит в зависимости от знака погрешности увеличение или уменьшение управляющего сигнала ведомой координаты, то есть происходит его непрерывная, двухсторонняя коррекция относительно номинального значения.

2.3 Синтез гибридной кинематической структуры станка по схеме равнозначных координат

Методику функционального проектирования кинематической структуры станка с системой синхронизации по схеме равнозначных координат рассмотрим на примере фрезерования червячной фрезой винтовых и прямых шлицев.

Боковые поверхности прямобочных шлицев очерчены отрезками прямой, а боковые поверхности эвольвентных шлицев – отрезками левой и правой эвольвент. Линия прямобочных и эвольвентных шлицев по длине может быть как прямой, так и винтовой.

Червячная фреза представляет собой совокупность исходных режущих реек, расположенных на цилиндре и смещенных одна относительно другой по винтовой линии. Режущий контур зубьев, каждый из которых имеет правую и левую режущие кромки в виде материальных линий, очерчен отрезками прямых для прямобочного шлица и отрезками левой и правой эвольвент для эвольвентного шлица. Характеристический образ червячной фрезы есть K -элементный класс равномоощных множеств $\{M_\varepsilon\}_K$, где $\{M_\varepsilon\}$ – множество материальных точек, образующих вершинную и боковые режущие кромки каждого зуба фрезы [90].

Размеры режущих зубьев обычно соответствуют размерам впадин между нарезаемыми шлицами, а их геометрическое взаимное положение обусловлено необходимостью выполнения делительного процесса и определяется окружным шагом нарезаемого шлицевого вала. Форма режущей кромки червячной фрезы и форма профиля шлица нарезаемого вала различаются между собой. Поэтому профили шлицев можно получить только посредством сложного движения обката. Воспроизводящая линия по длине шлица образуется посредством касания, так как образуемая линия является касательной к ряду дополнительных окружностей, создаваемых вращающимися материальными точками воспроизводящего режущего контура (характеристического образа инструмента). Таким образом, образование боковой поверхности шлица должно осуществляться сочетанием обката (профиль шлица) и касания (линия шлица по длине).

На рисунке 2.3.1 приведена схема классического способа обработки шлицевых валов червячной фрезой. По классу образования шлицевой поверхности ($H^K - П$) устанавливаем количество движений формообразования. Для воспроизведения профиля шлицев обкатом фрезе и заготовке сообщают функционально связанные движения соответственно B_1 и B_2 , образующие сложное двухэлементарное формообразующее движение $\Phi_v(B_1B_2)$ скорости резания. А для воспроизведения касанием винтовой линии по длине шлицев – функционально связанные движения соответственно $П_3$ и B_4 , образующие сложное

формообразующее движение $\Phi_s(P_3B_4)$ подачи. При этом движение B_4 выполняет дополнительный поворот фрезы для перемещения ее характеристического образа по винтовой направляющей в движении P_3 .

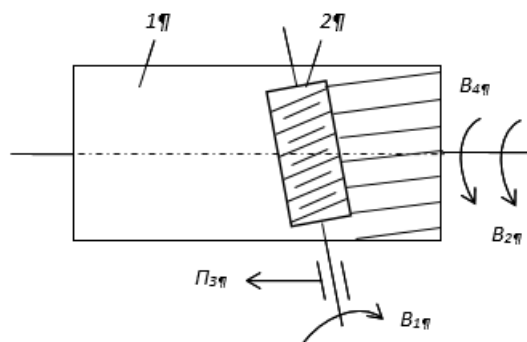


Рисунок 2.3.1. – Способ фрезерования червячной фрезой шлицевых валов

При фрезеровании прямых шлицев отпадает необходимость в движении B_4 . Следовательно, движение касания должно осуществлять перемещение характеристического образа по прямой направляющей. В этом случае сложное двухэлементарное формообразующее движение $\Phi_s(P_3B_4)$ преобразуется в простое движение $\Phi_s(P_3)$. Однако по определению движение касания это два одновременно выполняемых, функционально не связанных простых (элементарных), вращательного и прямолинейного движений. Отсюда следует, что простое движение $\Phi_s(P_3)$ более корректно представить в виде составного движения $\Phi_s(P_3*V_1)$, где символ «*» составного движения однозначно устанавливает логическую связь между вербальным и логико-математическом определении понятия движения касания.

При фрезеровании червячными фрезами процессы деления и врезания осуществляются попутно в процессе формообразования. Следовательно, основная часть структуры станка должна состоять только из сложных формообразующих групп $\Phi_v(B_1B_2)$ и $\Phi_s(P_3B_4)$ при фрезеровании винтовых шлицев или из сложной и простой формообразующих групп $\Phi_v(B_1B_2)$ и $\Phi_s(P_3*V_1)$ при фрезеровании прямых шлицев. Общую компоновку (рисунок 2.3.2) базовых блоков и подвижных исполнительных органов выполним аналогично компоновке, принятой для шлицефрезерных станков. Управляемые электродвигатели предпочтительно синхронные переменного тока M_1, M_2, M_3 кинематически свяжем соответственно со шпинделем 1 червячной фрезы 2, шпинделем 3, несущим заготовку, и тяговым валом TB , выполненным в виде передачи винт – гайка с телами качения. Гайку тягового вала жесткой связью 4 соединим с суппортом 5, несущим шпиндель 1 червячной фрезы 2. Шпиндель червячной фрезы, шпиндель заготовки и суппорт червячной фрезы являются подвижными исполнительными органами станка.

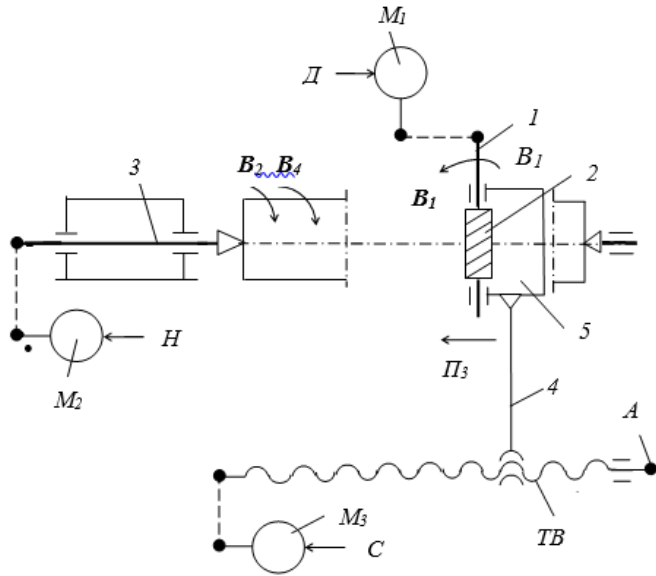


Рисунок 2.3.2 – Исполнительные органы гибридной структурной схемы шлицефрезерного станка

Общим задачиком для исполнительных органов (рисунок 2.3.3) является эталонный генератор I , вырабатывающий задающий импульсный сигнал, частота которого превышает частоту импульсных сигналов – аналогов частот вращения шпинделя червячной фрезы, шпинделя заготовки и тягового вала.

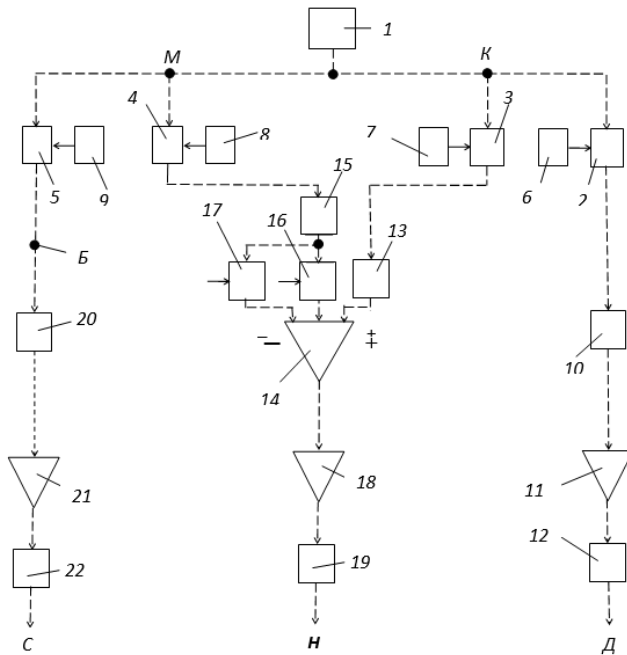


Рисунок 2.3.3. - Система синхронизации исполнительных органов шлицефрезерного станка по схеме равнозначных координат

Эталонный генератор 1 соединим с входами делителей частоты, выполненных в виде счетчиков 2, 3, 4, 5 и соединенных с ними блоков установки коэффициентов деления соответственно 6, 7, 8, 9. Функция этих блоков – установка передаточных отношений при наладке станка. Выход счетчика 2 соединим с входом блока 10 круговой частоты шпинделя фрезы в движении B_1 . Выход блока 10 посредством предварительного усилителя 11 соединим с усилителем мощности 12. А выход этого усилителя соединим с управляемым электродвигателем M_1 (см. рисунок 2.3.2) привода вращения фрезы.

Выход счетчика 3 соединим с входом блока 13 круговой частоты шпинделя заготовки в движении B_2 , выход которого соединим с первым входом сложения параллельного сумматора 14. Выход счетчика 4 соединим с входом блока 15 круговой частоты шпинделя заготовки в движении B_4 , у которого выход соединен с входами ключей 16 и 17, управляемых положительным потенциалом. Выходы этих ключей соединим соответственно со вторым входом сложения и входом вычитания параллельного сумматора 14. Выход параллельного сумматора 14 соединим через предварительный усилитель 18 и усилитель мощности 19 с управляемым электродвигателем M_2 (см. рисунок 2.3.2) привода вращения шпинделя заготовки.

Выход счетчика 5 соединим с входом блока 20 круговой частоты ведущего звена тягового вала TB , преобразующего вращательное движение в продольную подачу $П_3$ суппорта 5. Выход блока 20 посредством предварительного усилителя 21 соединим с усилителем мощности 22. Выход этого усилителя соединим с управляемым электродвигателем M_3 (см. рисунок 2.3.2) привода продольной подачи суппорта.

Блоки 10, 13, 15, 20 круговых частот соответственно шпинделя фрезы, шпинделя заготовки, винта тягового вала выполняются одинаково по схеме частота-напряжение. В этих блоках задающие импульсные сигналы преобразуются в напряжение, пропорциональное частоте входного сигнала. Функциональное назначение блоков – задание скорости резания в движении B_1 шпинделя червячной фрезы, суммарной круговой подачи шпинделя заготовки в движении $B_2 \pm B_4$, продольной подачи в движении $П_3$ суппорта червячной фрезы.

Запишем связи, проектируемой гибридной структурной схемы станка на языке символов, используемым в работе [88].

Группа $\Phi_v(B_1 B_2)$. Ее внутренняя связь – мехатронная цепь, связывающая червячную фрезу и обрабатываемую заготовку:

$$B_1 \leftarrow \text{шпиндель 1 фрезы} \leftarrow M_1 \rightarrow D \leftarrow 12 \leftarrow \text{электронный вал} (11 \leftarrow 10 \leftarrow \\ \leftarrow 2 \leftarrow \text{разъем } K \rightarrow 3 \rightarrow 13 \rightarrow 14 \rightarrow 18) \rightarrow 19 \rightarrow H \rightarrow M_2 \rightarrow \text{шпиндель 3} \rightarrow B_2.$$

Внешняя связь:

эталонный генератор 1 → разъем К (звено соединения связей).

Группа настраивается на два параметра: на траекторию – делителем частоты (3 - 7); на скорость воспроизведения профиля шлицев скорость (резания) – делителем частоты (2 – 6).

Группа $\Phi_s(P_3B_4)$. Ее внутренняя связь – мехатронная цепь, связывающая суппорт 5, фрезы и обрабатываемую заготовку:

$P_3 \leftarrow \text{суппорт } 5 \leftarrow TB \leftarrow M_3 \leftarrow C \rightarrow 22 \leftarrow \text{электронный вал } (21 \leftarrow 20 \leftarrow 5 \leftarrow \text{разъем } M \rightarrow 4 \rightarrow 15 \rightarrow 16$
или $17 \rightarrow 14 \rightarrow 18) \rightarrow 19 \rightarrow H \rightarrow M_2 \rightarrow \text{шпиндель } 3 \rightarrow B_4$.

Внешняя связь:

эталонный генератор 1 → разъем М (звено соединения связей).

Группа настраивается по четырем параметрам: на траекторию – делителем частоты (4 -8); на скорость воспроизведения винтовой линии (подачи) – делителем частоты (5 – 9); на путь и исходное положение – программно.

Согласно нормативам резания при шлицефрезеровании червячными фрезами скорость резания принимается по круговой частоте фрезы (движение B_1), а подача по ее перемещению параллельно оси заготовки (движение P_3).

При наладке станка блоком 6 установки коэффициента деления задают частоту импульсного сигнала на выходе счетчика 2, соответствующую заданной скорости резания. Аналогично блоком 9 установки коэффициента деления задают частоту импульсного сигнала на выходе счетчика 5, соответствующую заданной подаче.

В мехатронных технических решениях расчетные цепи, РП, УКЦ, ФН будем рассматривать также как в аналогичных технических решениях, содержащих только механические связи. При этом заменим термин «передаточное отношение органа настройки» термином «коэффициент деления органа настройки». Целесообразность такой замены объясняется тем, что механический орган настройки, например гитара сменных зубчатых колес, и делитель частоты по функциональному назначению идентичны.

Выведем коэффициенты деления k_1, k_2, k_3, k_4 для делителей частоты (2 – 6), (3 – 7), (5 – 9), (4 – 8), соответственно.

Группа движение обката $\Phi_v(B_1B_2)$. Ее внутренняя связь и расчетная цепь совпадают. Поэтому РП для исполнительных органов станочного зацепления, воспроизводящего движение обката, имеют вид:

$1 \text{ об. шпинделя } 1 \text{ фрезы } (B_1) \rightarrow k/z \text{ об. шпинделя } 3 \text{ заготовки } (B_2),$

где k - число заходов червячной фрезы; z – число нарезаемых шлицев.

Тогда, УКЦ станочного зацепления:

$$k/z = 1 \cdot c_1 \cdot n_1 / n_2,$$

где c_1 – произведение передаточных отношений постоянных механических передач расчетной связи; n_1 – круговая частота электродвигателя M_1 , соответствующая заданной скорости резания, мин^{-1} ; n_2 – круговая частота электродвигателя M_2 , необходимая для обеспечения функциональной связи в движении обката, мин^{-1} .

Заменим в УКЦ отношение круговых частот отношением коэффициентов деления на соответствующих блоках. Тогда,

$$k/z = I \cdot c_1 \cdot k_1 / k_2.$$

По этому выражению определим коэффициент деления (ФН), устанавливаемый на делителе частоты (3 – 7):

$$k_2 = (c_1 z/k) k_1,$$

где k_1 – коэффициент деления, установленный на делителе частоты (2 – 6), соответствующий заданной круговой частоте электродвигателя M_1 (скорости резания); k_2 – коэффициент деления, который необходимо установить на делителе частоты (3 – 7) для обеспечения функциональной связи шпинделя фрезы и шпинделя заготовки.

Группа винтового движения $\Phi_s(P_3B_4)$. Ее внутренняя связь и расчетная цепь совпадают. Поэтому РП для исполнительных органов станочного зацепления, воспроизводящего винтовое движение, имеют вид:

$$P \text{ мм перемещения суппорта } 5 (P_3) \rightarrow 1 \text{ об. шпинделя } 3 (B_4).$$

Тогда, УКЦ станочного зацепления:

$$I = (P / P_{TB} \cdot (n_3 / n_2) \cdot c_2,$$

где P – шаг винтовой линии нарезаемых шлицев; P_{TB} – шаг тягового вала; c_2 – произведения постоянных механических передач кинематической связи; n_3 – круговая частота электродвигателя M_3 , соответствующая заданной подаче, мм/мин ; n_4 – круговая частота электродвигателя M_2 , необходимая для обеспечения функциональной связи в винтовом движении.

Заменим в УКЦ отношение круговых частот отношением коэффициентов деления на соответствующих блоках:

$$I = (P / P_{TB}) \cdot (k_3 / k_4) \cdot c_2.$$

По этому выражению определим коэффициент деления (ФН), устанавливаемый на делителе частоты (4 -8):

$$k_4 = (c_2 T/P) k_3,$$

где; k_3 – коэффициент деления, установленный на делителе частоты (5 – 9), соответствующий заданной круговой частоте электродвигателя M_3 (скорости подачи). k_4 – коэффициент деления, который необходимо установить на делителе частоты (4 – 8) для обеспечения функциональной связи суппорта и шпинделя заготовки.

Шпиндель заготовки является исполнительным органом обоих станочных зацеплений. При работе устройства результирующая круговая частота этого шпинделя представляет собой математическую сумму $B_2 \pm B_4$ двух движений B_2 и B_4 , образующих совместно соответственно с движениями B_1 и P_3 движение обката $\Phi_v(B_1B_2)$ и винтовое движение $\Phi_s(P_3B_4)$. Суммирование движений B_2 и B_4 осуществляется параллельным сумматором I_4 , являющимся аналогом механического суммирующего механизма, используемого в станках с механическими связями.

Выбор знака в математической сумме движений зависит от направления винтовых линий шлицев и червячной фрезы. Знак «+» соответствует условию, когда винтовые линии одноименны, например, обе левые, знак «-» соответствует условию, когда винтовые линии разноименны, например, одна правая, а другая левая. Необходимый знак устанавливается при наладке устройства подачей управляющего сигнала на потенциальный вход или ключа I_6 , или ключа I_7 .

Станок работает следующим образом. При включении эталонного генератора I задающий высокочастотный импульсный сигнал с его выхода поступает на счетчики $2, 3, 4, 5$ делителей частоты, в которых происходит деление задающего сигнала в соответствии с коэффициентами деления, установленными на блоках задания этих коэффициентов $6, 7, 8, 9$.

Импульсный сигнал с выхода счетчика 2 поступает на вход блока 10 круговой частоты шпинделя фрезы, где происходит его преобразование в напряжение, пропорциональное частоте входного сигнала. С выхода блока 10 сигнал через предварительный усилитель 11 и усилитель мощности 12 сообщается управляемому электродвигателю M_1 , который сообщает вращательное движение B_1 шпинделю фрезы с круговой частотой, соответствующей заданной скорости резания. Синхронно с выхода счетчика 3 импульсный сигнал поступает на вход блока 13 круговой подачи шпинделя заготовки в движении B_2 , где происходит его преобразование в напряжение, пропорциональное частоте. Выходной сигнал с блока 13 поступает на первый вход сложения параллельного сумматора I_4 . Синхронно с выхода счетчика 4 импульсный сигнал поступает на вход блока 15 круговой подачи шпинделя заготовки в движении B_4 , где происходит его преобразование в напряжение, пропорциональное частоте. Выходной сигнал с блока 15 поступает в зависимости от знака математического сложения движений B_2 и B_4 на одном исполнительном органе или через ключ I_6 на второй вход сложения параллельного сумматора I_4 , или через ключ I_7 на вход вычитания этого сумматора. С выхода параллельного сумматора I_4 результирующий сигнал через предварительный усилитель 18 и усилитель мощности 19 сообщается управляемому электродвигателю M_2 ,

который сообщает вращательное движение $B_2 \pm B_4$ круговой подачи шпинделю заготовки с круговой частотой, согласованной с движениями B_1 и $П_3$ червячной фрезы. Синхронно с выхода счетчика 5 импульсный сигнал поступает на вход блока 20 продольной подачи суппорта в движении $П_3$, где происходит его преобразование в напряжение, пропорциональное частоте входного сигнала. Выходной сигнал с блока 20 через предварительный усилитель 21 и усилитель мощности 22 сообщается управляемому электродвигателю M_3 , который посредством тягового вала TB сообщает движение $П_3$ суппорту фрезы, пропорциональное частоте сигнала на выходе делителя частоты 5.

В итоге описанного прохождения сигнала от общего задатчика – эталонного генератора 1 к трем исполнительным органам - шпинделю червячной фрезы, шпинделю заготовки, суппорту червячной фрезы, образующим два станочных зацепления, происходит воспроизведение профиля и винтовой линии по длине шлицев на обрабатываемой заготовке.

На станке можно обрабатывать также шлицевые поверхности с прямыми шлицами. Для этого достаточно отключить делитель частоты (4 – 8). В результате сложное двухэлементарное движение продольной подачи суппорта $\Phi_s(П_3B_4)$, а следовательно, и соответствующая формообразующая группа преобразуется к виду $\Phi_s(П_3*B_2)$.

Выше при функциональном проектировании кинематической структуры станка для нарезания резьбы решалась также задача устранения отрицательного влияния девиации механики подачи инструментального суппорта на качество обрабатываемой поверхности. Используемый для этого формирователь сигнала коррекции задающего сигнала (см. рисунок 2.2.2) без изменений можно включить и в проектируемую структурную схему. Для этого необходимо на тяговом валу TB (см. рисунок 2.3.3, позиция А) установить импульсный измерительный преобразователь, и соединить его с входом А формирователя сигнала коррекции (см. рисунок 2.2.2, позиция А). Вход В этого формирователя необходимо соединить со счетчиком 5 (см. рисунок 5, позиция Б). Из схемы синхронизации необходимо исключить предварительный усилитель 21, а выход импульсно-аналогового преобразователя 20 соединить с первым входом сложения параллельного сумматора 6 (см. рисунок 2.2.2) формирователя сигнала коррекции. Выход параллельного сумматора необходимо соединить с усилителем мощности 22.

Уместно отметить, что данная мехатронная структурная схема шлицефрезерного станка, разработанная по методике функционального проектирования, признана изобретением [91].

2.4 Электронная система синхронизации исполнительных органов станка для обработки двухшаговых червяков чашечным резцом

В рассмотренном в работе [88] специализированном станке с механическими связями для обработки двухшаговых червяков чашечным резцом по условиям компоновки обе формообразующие группы содержат механические передачи, в том числе органы настройки на параметры исполнительных движений. Основными органами настройки, обеспечивающими функциональную связь между исполнительными органами станка при заданных передаточных отношениях (параметр траектория) инструмент – заготовка, являются четырехколесные гитары сменных зубчатых колес. Двухэлементарная группа скорости резания Φ_v во внутренней связи содержит один такой орган настройки, а трехэлементарная группа подачи Φ_s – два органа настройки. При этом по внутренним связям обе группы соединены посредством дифференциального механизма, обеспечивающего сложение исполнительных движений на шпинделе заготовки. Механические передачи функциональных связей являются основным источником погрешностей при обработке и основным источником шума станка. Это обстоятельство – одна из причин поиска технических решений на основе типовых интегральных схем и управляемых приводов.

На рисунке 2.3.2 представлена структурная схема приводов станка для обработки червяков с начальной конической поверхностью. Общая компоновка базовых элементов выполнена аналогично компоновке, принятой для специализированных станков с механическими связями для обработки червяков чашечным резцом. Структурная схема станка содержит две сложные формообразующие группы: $\Phi_v(B_1B_2)$ и $\Phi_s(П_3П_4B_5)$.

Управляемые электродвигатели M_1, M_2, M_3, M_4 кинематически связаны соответственно со шпинделем 1, несущим заготовку 2 обрабатываемого червяка, шпинделем 3 чашечного резца 4, тяговыми валами TB_1 и TB_2 , выполненными в виде передач винт – гайка с телами качения. Гайка TB_1 жесткой связью соединена с продольным суппортом 5, а гайка TB_2 – с поперечным суппортом 6, несущим шпиндель 3 чашечного резца 4. Шпиндель 1, шпиндель 3, продольный суппорт 5 и поперечный суппорт 6 являются исполнительными органами станка. Для обеспечения связи механики станка с системой синхронизации на шпинделях 1 и 3, винтах тяговых валов TB_1 и TB_2 установлены импульсные измерительные преобразователи соответственно 7, 8, 9, 10. Эти преобразователи служат для преобразования механического движения исполнительных органов в последовательности импульсов, сообщаемых в электронную систему синхронизации.

Система синхронизации выполнена по схеме равнозначных координат с автоматической двухсторонней коррекцией управляющих сигналов по погрешностям механики исполнительных органов. Эта система является модификацией системы по патентному первоисточнику [91].

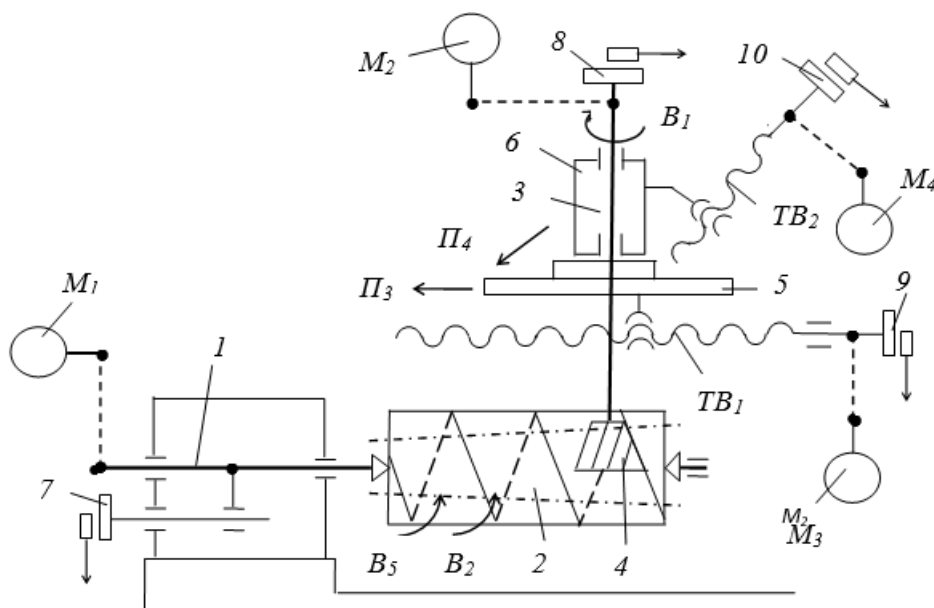


Рисунок 2.4.1. - Структурная схема приводов станка для нарезания двухшаговых червяков

Система синхронизации содержит две подсистемы с общим задатчиком (эталонным генератором), вырабатывающим задающий сигнал, частота которого превышает чистоту импульсного сигнала – аналога частоты вращения шпинделя заготовки. Первая подсистема осуществляет синхронизацию приводов кинематической группы скорости резания. А вторая подсистема – синхронизацию приводов кинематической группы подачи.

На рисунке 2.4.2 приведена блок-схема подсистемы синхронизации (электронный вал) приводов исполнительных органов группы обката $\Phi_v(B_1B_2)$, воспроизводящей профиль витков червяка.

Эталонный генератор 1 соединен с входами счетчиков 2 и 3, к которым присоединены блоки установки коэффициентов деления соответственно 4 и 5. Функция этих блоков – установка передаточных отношений при настройке станка. Счетчики и соответствующие блоки установки коэффициентов деления образуют делители частоты задающих эталонных импульсных сигналов управления соответствующих исполнительных органов (управляемых координат). Выход счетчика 2 соединен с входом блока 6 круговой частоты шпинделя чашечного резца в движении B_1 и первыми входами знакового 7 и фазового 8 дискриминаторов, вторые входы которых соединены с

импульсным измерительным преобразователем 8, установленном на шпинделе 3 чашечного резца (см. рисунок 2.4.1).

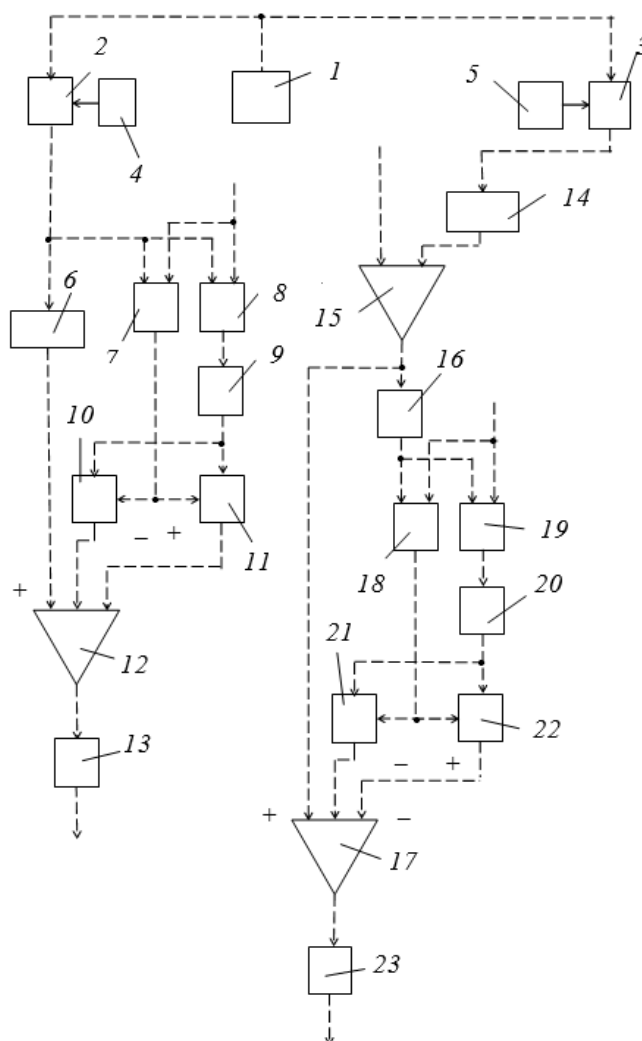


Рисунок 2.4.2. - Блок-схема подсистемы синхронизации приводов группы обката $\Phi_v(B_1B_2)$

Выход фазового дискриминатора 8 соединен с входом импульсно-аналогового преобразователя 9, соединенного своим выходом с аналоговыми входами аналогового ключа 10, управляемого отрицательным потенциалом, и аналогового ключа 11, управляемого положительным потенциалом. Управляющие входы ключей 10 и 11 соединены с выходом знакового дискриминатора 7. Выход блока 6 круговой частоты шпинделя фрезы соединен с первым входом сложения параллельного сумматора 12, у которого второй вход сложения и вход вычитания соединены соответственно с выходом аналогового ключа 10, управляемого отрицательным потенциалом, и с выходом аналогового ключа 11, управляемого положительным потенциалом. Выход параллельного сумматора 12 через усилитель мощности 13 соединен с управляемым электродвигателем M_2 привода вращения шпинделя чашечного резца.

Выход счетчика 3 соединен с входом блока 14 круговой частоты шпинделя заготовки в движении V_1 , выход которого соединен с первым входом сумматора 15. Его выход соединен с входом аналого-импульсного преобразователя 16 и с первым входом сложения параллельного сумматора 17. Выход аналого-импульсного преобразователя 16 соединен с первыми входами знакового 18 и фазового 19 дискриминаторов. Вторые входы дискриминаторов соединены с импульсным измерительным преобразователем 7, установленном на шпинделе заготовки (см. рисунок 2.4.1).

Выход фазового дискриминатора 19 соединен с входом импульсно-аналогового преобразователя 20, соединенного своим выходом с аналоговыми входами аналогового ключа 21, управляемого отрицательным потенциалом и аналогового ключа 22, управляемого положительным потенциалом. Управляющие входы ключей 21 и 22 соединены с выходом знакового дискриминатора 18. Выходы ключей 21 и 22 соединены соответственно с вторым входом сложения и входом вычитания параллельного сумматора 17. Выход параллельного сумматора 17 через усилитель мощности 23 соединен с управляемым электродвигателем M_1 привода вращения заготовки в движении V_1 (см. рисунок 2.4.1).

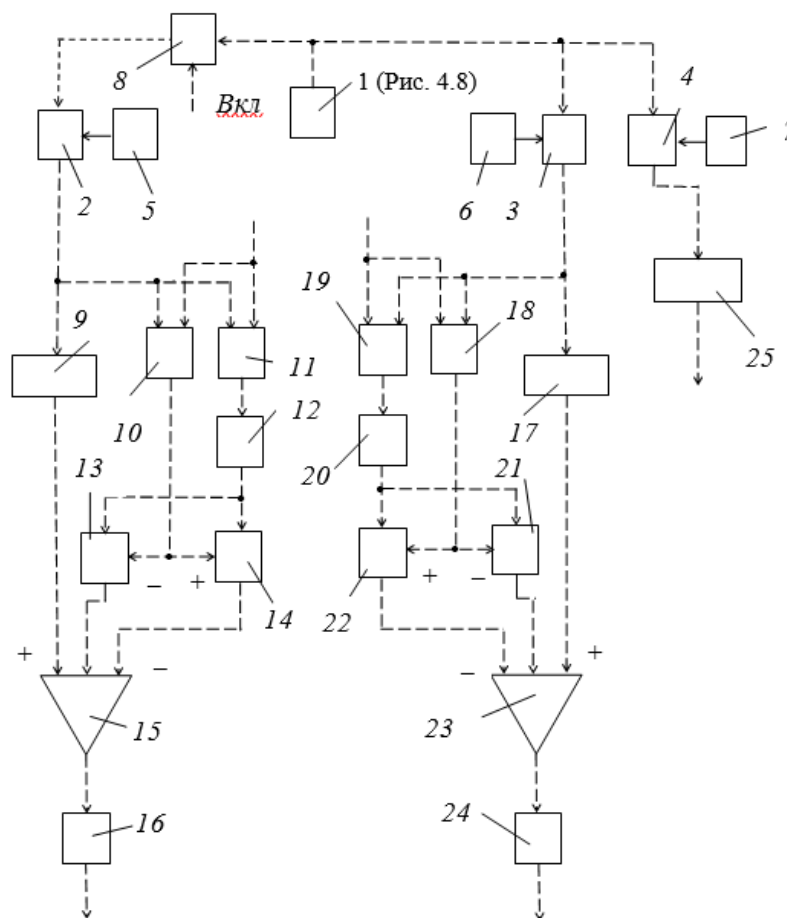


Рисунок 2.4.3. - Блок-схема подсистемы синхронизации приводов группы подачи $\Phi_s(П_3П_4В_5)$

На рисунке 2.4.3 приведена блок-схема подсистемы синхронизации (электронный вал) приводов исполнительных органов группы $\Phi_s(П_3П_4В_5)$, воспроизводящей линию витка.

Счетчики 2, 3, 4 с присоединенными к ним блоками установки коэффициентов деления соответственно 5, 6, 7 образуют делители частоты задающих эталонных импульсных сигналов. Входы счетчиков 3 и 4 соединены с выходом эталонного генератора 1, а вход счетчика 2 соединен с выходом этого генератора через ключ 8 с потенциальным управляющим входом. Выход счетчика 2 соединен с входом блока 9 круговой частоты винта тягового вала TB_2 , преобразуемой этим валом в поперечную подачу $П_4$ суппорта 6, и первыми входами знакового 10 и фазового 11 дискриминаторов, вторые входы которых соединены с импульсным измерительным преобразователем 10, установленном на винте TB_2 (см. рисунок 2.4.1). Выход фазового дискриминатора 11 соединен с входом импульсно-аналогового преобразователя 12, соединенного своим выходом с аналоговыми входами аналогового ключа 13, управляемого отрицательным потенциалом, и аналогового ключа 14, управляемого положительным потенциалом. Управляющие входы ключей 13 и 14 соединены с выходом знакового дискриминатора 10. Выход блока круговой частоты 9 винта TB_2 соединен с первым входом сложения параллельного сумматора 15, у которого второй вход сложения и вход вычитания соединены соответственно с выходом аналогового ключа 13, управляемого отрицательным потенциалом, и с выходом аналогового ключа 14, управляемого положительным потенциалом. Выход параллельного сумматора 15 через усилитель мощности 16 соединен с управляемым электродвигателем M_4 привода поперечной подачи суппорта 6 (см. рисунок 2.4.1).

Выход счетчика 3 соединен с входом блока 17 круговой частоты винта тягового вала TB_1 , преобразуемой этим валом в поддачу $П_3$ продольного суппорта, и первыми входами знакового 18 и фазового 19 дискриминаторов, вторые входы которых соединены с импульсным измерительным преобразователем 9, установленном на винте TB_1 (см. рисунок 2.4.1).

Выход фазового дискриминатора 19 соединен с входом импульсно-аналогового преобразователя 20, соединенного своим выходом с аналоговыми входами аналогового ключа 21, управляемого отрицательным потенциалом, и аналогового ключа 22, управляемого положительным потенциалом. Управляющие входы ключей 21 и 22 соединены с выходом знакового дискриминатора 18. Выход блока 17 круговой частоты винта TB_1 соединен с первым входом сложения параллельного сумматора 23, у которого второй вход сложения и вход вычитания соединены соответственно с выходом

аналогового ключа 21, управляемого отрицательным потенциалом, и с выходом аналогового ключа 22, управляемого положительным потенциалом. Выход параллельного сумматора 23 через усилитель мощности 24 соединен с управляемым электродвигателем M_3 привода подачи продольного суппорта (см. рисунок 2.4.1).

Выход счетчика 4 соединен с входом блока 25 круговой частоты шпинделя заготовки в движении B_5 , у которого выход соединен со вторым входом сумматора 15 (см. рисунок 2.4.2).

Блоки 6, 14 (рисунок 2.4.2) и блоки 9, 17, 25 (рисунок 2.4.3) круговых частот соответственно шпинделя чашечного резца (движение B_2), шпинделя заготовки (движение B_1), винта тягового вала TB_2), винта тягового вала TB_1), шпинделя заготовки (движение B_5) выполнены по схеме частота-напряжение. В этих блоках эталонные импульсные сигналы преобразуются в напряжение, пропорциональное частоте входного сигнала.

Нормативными параметрами при обработке являются скорость резания (скорость воспроизведения профиля), задаваемая по круговой частоте заготовки (движение B_1), и продольная подача (скорость воспроизведения винтовой линии) чашечного резца (движение P_3). При наладке станка блоком 5 установки коэффициента деления (см. рисунок 2.4.2) задается частота импульсного сигнала на выходе счетчика 3, соответствующая управляющему сигналу на электродвигателе M_1 , при котором шпиндель 1 заготовки в движении B_1 вращается со скоростью, соответствующей заданной скорости резания. Аналогично блоком 6 установки коэффициента деления (см. рисунок 2.4.3) задается частота импульсного сигнала на выходе счетчика 3, соответствующая управляющему сигналу на электродвигателе M_3 , при котором продольный суппорт 5 в движении P_3 движется со скоростью, соответствующей заданной подаче.

Остальные делители частоты рассматриваемой системы синхронизации являются органами настройки на траекторию исполнительных движений. Коэффициенты деления для них выводятся на основе расчетных перемещений для исполнительных органов станочного зацепления сложных кинематических групп.

РП для исполнительных органов станочного зацепления, воспроизводящего движение обката $\Phi_v(B_1B_2)$:

$$1 \text{ об. шпинделя заготовки } (B_1) \rightarrow k/z \text{ об. чашечного резца } (B_2),$$

где k – число заходов обрабатываемого червяка; z – число зубьев чашечного резца.

УКЦ кинематической связи станочного зацепления:

$$k/z = I c_1 n_1 / n_2,$$

где c_1 – произведение передаточных отношений механических передач кинематической связи; n_1 – круговая частота электродвигателя M_1 , соответствующая заданной скорости

резания, мин^{-1} ; n_2 - круговая частота электродвигателя M_2 , необходимая для обеспечения функциональной связи в движении обката, мин^{-1} .

Заменим в УКЦ отношение круговых частот отношением коэффициентов деления на соответствующих блоках, тогда

$$\kappa/z = 1 c_1 i_1 / i_2,$$

По этому выражению определим коэффициент деления (ФН), устанавливаемый на блоке 4 делителя частоты 2:

$$i_2 = (c_1 z/\kappa) i_1,$$

где i_1 – коэффициент деления, установленной на блоке 5 счетчика 3, соответствующий заданной круговой частоте электродвигателя M_1 ; i_2 - коэффициент деления, который необходимо установить на блоке 4 счетчика 2 для обеспечения функциональной связи шпинделя заготовки (B_1) и шпинделя чашечного резца (B_2).

Трехэлементарная группа подачи $\Phi_s(П_3П_4B_5)$ воспроизводит два станочных зацепления. Первое зацепление обеспечивает перемещение чашечного резца по конической начальной поверхности обрабатываемого червяка. РП для данного зацепления:

$$S_{np} \text{ перемещение чашечного резца в движении } (П_3) \rightarrow S_{non} \text{ перемещение чашечного резца в движении } (П_4),$$

где S_{np} – нормируемая продольная подача инструмента; S_{non} – поперечная подача инструмента, $S_{non} = S_{np} \text{ tg}\varepsilon$; ε – угол наклона конической начальной поверхности обрабатываемого долбяка.

УКЦ кинематической связи станочного зацепления:

$$S_{non} = S_{np} \text{ tg}\varepsilon c 1/P_{TB1} P_{TB2} = c_2 S_{np} \text{ tg}\varepsilon,$$

где $c_2 = c P_{TB2} / P_{TB1}$ – константа; c – произведение передаточных отношений постоянных механических передач кинематической цепи; P_{TB1} и P_{TB2} – шаги винтов TB_1 и TB_2 соответственно.

Угол ε наклона образующей начальной поверхности червяка определяется по формуле [92]:

$$\varepsilon = \text{arc tg } (\Delta/2 \text{ tg } \alpha_0),$$

где $\Delta = \alpha l_p / l_p$ – коэффициент приращения шага; α – коэффициент допустимого износа; l_p – дополнительная длина червяка; α_0 – угол зацепления.

Заменим в УКЦ отношения подач отношением коэффициентов деления на соответствующих блоках, тогда

$$i_4 = i_3 c_2 \text{ tg}\varepsilon,$$

где i_3 – коэффициент деления, установленный на блоке 6 счетчика 3, соответствующий заданной круговой частоте электродвигателя M_3 ; i_4 - коэффициент деления,

устанавливаемый на блоке 5 счетчика 2, соответствующий поперечной подаче чашечного резца в движении $П_4$ для обеспечения функциональной связи продольного суппорта и поперечного суппортов.

Второе станочное зацепление группы подачи обеспечивает воспроизведение винтовой линии витка по конической начальной поверхности. РП для этого зацепления:

$$T \text{ мм перемещения продольного суппорта в движении } П_3 \rightarrow \\ \rightarrow 1 \text{ об. шпинделя заготовки в движении } В_5,$$

где T – шаг винтовой линии обрабатываемого червяка.

УКЦ кинематической связи станочного зацепления:

$$I = c (T / P_{ТВ1}) (n_3 / n_5) = c_3 T (n_3 / n_5),$$

где $c_3 = c / P_{ТВ1}$ – константа; c – произведение передаточных отношений постоянных механических передач кинематической связи; n_3 – дополнительная круговая частота электродвигателя M_1 , необходимая для обеспечения функциональной связи в винтовом движении.

Заменим в УКЦ кинематической связи отношение круговых частот отношением коэффициентов деления на соответствующих блоках:

$$I = c_3 T (i_3 / i_5).$$

По полученному выражению определяется коэффициент деления, устанавливаемый на блоке 7 счетчика 4:

$$i_5 = c_3 i_3 T,$$

где i_3 – коэффициент деления, установленный на блоке 5 счетчика 2, соответствующий заданной подаче продольного суппорта; i_5 – коэффициент деления, который необходимо установить на блоке 7 счетчика 4 для обеспечения функциональной связи продольного суппорта и шпинделя заготовки.

Станок работает следующим образом. При включении эталонного генератора I задающий, высокочастотный, импульсный сигнал с его выхода поступает на счетчики системы синхронизации, в которых происходит деление задающего сигнала в соответствии с коэффициентами деления, установленными на блоках задания этих коэффициентов.

Импульсный сигнал с выхода счетчика 3 поступает на вход блока 14 (см. рисунок 2.4.2) круговой частоты шпинделя I заготовки, где происходит его преобразование в напряжение пропорциональное частоте входного сигнала. Выходной сигнал с блока 14 через первый вход сложения – выход сумматора 15, первый вход сложения – выход параллельного сумматора 17 и усилитель мощности 23 поступает на управляемый электродвигатель M_1 , который сообщает вращательное движение $В_1$ шпинделю заготовки обрабатываемого червяка. Синхронно импульсный сигнал с выхода счетчика 2 поступает

на вход блока 6 круговой частоты шпинделя чашечного резца, где происходит его преобразование в напряжение, пропорциональное частоте входного сигнала. Выходной сигнал с блока 6 через первый вход сложения- выход параллельного сумматора 12 и усилитель мощности 13 поступает на управляемый электродвигатель M_2 , который сообщает вращательное движение B_2 шпинделю чашечного резца с круговой частотой, пропорциональной частоте эталонного сигнала на выходе счетчика 2.

Одновременно с выхода счетчика 3 (см. рисунок 2.4.3) импульсный сигнал поступает на вход блока 17 продольной подачи суппорта, где происходит его преобразование в напряжение, пропорциональное частоте входного сигнала. Выходной сигнал с блока 17 поступает через первый вход сложения – выход параллельного сумматора 23 и усилитель мощности 24 на управляемый электродвигатель M_3 , который посредством TB_1 сообщает движение P_3 продольному суппорту. Синхронно с выхода счетчика 2 импульсный сигнал поступает на блок 9 подачи поперечного суппорта, где этот сигнал преобразуется в напряжение, пропорциональное частоте входного сигнала. Сигнал с выхода блока 9 через первый вход сложения – выход параллельного сумматора 15 и усилитель мощности 16 поступает на управляемый электродвигатель M_4 , который посредством TB_2 сообщает движение P_4 поперечному суппорту. Синхронно с выхода счетчика 4 задающий сигнал, соответствующий круговой частоте шпинделя заготовки в движении B_5 поступает на блок 25, где происходит его преобразование в напряжение, пропорциональное частоте входного сигнала. С этого блока выходной сигнал поступает на второй вход сложения сумматора 15 (см. рисунок 2.4.2). В этом сумматоре происходит сложение двух задающих сигналов, соответствующих круговым частотам шпинделя заготовки в движениях B_1 и B_5 . В результате на первом входе параллельного сумматора 17 действует суммарный сигнал $B_1 + B_5$, управляющий электродвигателем M_1 шпинделя заготовки.

В итоге такого прохождения задающих сигналов от общего задатчика – эталонного генератора к исполнительным органам станка осуществляется обработка двухшагового червяка.

Одновременно обеспечивается устранение девиации механики исполнительных органов посредством двухсторонней коррекции сигналов управления электродвигателями, действующих на выходах параллельных сумматоров.

На первых входах фазового 8 и знакового 7 дискриминаторов (см. рисунок 2.4.3) постоянно действует импульсный сигнал с выхода счетчика 2. На вторые входы этих дискриминаторов поступает, вырабатываемый импульсным измерительным преобразователем 8 (см. рисунок 2.4.1) импульсный сигнал, соответствующий мгновенному значению действительной круговой частоты шпинделя чашечного резца. В

обоих дискриминаторах непрерывно происходит сравнение задающего сигнала с сигналом о действительном мгновенном положении шпинделя чашечного резца. В результате на выходе фазового дискриминатора 8 непрерывно образуется сигнал абсолютной погрешности. Этот сигнал после преобразования в импульсно-аналоговом преобразователе 9 поступает на аналоговые входы аналогового ключа 10, управляемого отрицательным потенциалом, и аналогового ключа 11, управляемого положительным потенциалом. На выходе знакового дискриминатора 7 образуется отрицательный потенциал при отставании шпинделя от заданного значения и положительный потенциал при опережении. Этот сигнал поступает на управляющие входы аналоговых ключей 10 и 11 и открывает один из них.

При открывании аналогового ключа 10, управляемого отрицательным потенциалом, сигнал с его выхода поступает на второй вход сложения параллельного сумматора 12, а при открывании аналогового ключа 11, управляемого положительным потенциалом, сигнал с его выхода поступает на вход вычитания параллельного сумматора 12. В сумматоре в зависимости от знака погрешности происходит увеличение или уменьшение сигнала, действующего на его первом входе сложения, то есть происходит его двухсторонняя автоматическая коррекция относительно заданного номинального значения. Аналогично осуществляется коррекция управляющего сигнала и на других параллельных сумматорах. Такой вид коррекции принято называть адаптивным предельным регулированием.

Для обработки традиционного одношагового червяка в системе синхронизации (см. рисунок 2.4.3) отключается от эталонного генератора 1 посредством ключа 8 счетчик 2. При этом группа скорости резания не изменяется, а трехэлементарная группа подачи трансформируется в двухэлементарную $\Phi_3(I_3V_5)$.

Выводы. Предложено использование функционального проектирования кинематической структуры станочного оборудования с ЧПУ, содержащего сложные мехатронные формообразующие группы, по закону его функционирования, задаваемому соответствующим виртуальным техническим решением - способом формообразующей обработки. Предложена методика настройки мехатронных формообразующих групп на траекторию сложного формообразующего движения и его скорость.

3 ОБОСНОВАНИЕ СТРУКТУРЫ СТАНОЧНОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ИЗДЕЛИЙ С ЗУБЧАТЫМ КОНТУРОМ

3.1 Кинематическая структура станочного оборудования

Структура станочного оборудования с кинематической точки зрения представляет собой совокупность кинематических групп. Сочетание двигателя внутренней и внешней связей, обеспечивающих заданного исполнительного движения, называется кинематической группой. Эти группы могут быть соединены между собой разными способами, что определяется разными факторами. Наибольшее влияние на соединение кинематических групп оказывают общность их исполнительных органов и источника движения, а также необходимость координации во времени создаваемых группами движений.

С учетом формообразующей части станка все многообразие кинематических структур металлорежущих станков можно разделить на три класса.

1. Класс элементарных структур Э, к которому относятся станки с кинематической структурой, содержащей только простые группы формообразования, т.е. группы, создающие движение $\Phi(V)$ и $\Phi(\Pi)$.

2. Класс сложных структур С, к которому относятся станки с кинематической структурой, содержащей только сложные группы формообразования, т.е. группы, создающие движения $\Phi(V_1V_2)$, $\Phi(V_3\Pi_4\Pi_5)$ и т.д.

3. Класс комбинированных структур К, к которому относятся станки с кинематической структурой, содержащей одновременно и простые и сложные группы формообразования.

Каждый класс содержит определенное число типовых кинематических структур станков, которые можно условно записать буквой с последующими двумя цифрами. Буква указывает на класс, первая цифра - на число формообразующих групп, вторая цифра - на суммарное число простых вращательных и прямолинейных движений, составляющих все формообразующие движения станка.

В основную часть кинематической структуры станка входят, помимо групп формообразования, также группы иного назначения – врезания и деления. Эти группы могут быть автономны или быть соединены с формообразующей частью структуры.

Таблица 3.1.1. - Классификатор структуры станочного оборудования для обработки изделий с зубчатым контуром

Количество групп	1				2					3				
	1	2	3	4	2	3	4	5	6	3	4	5	6	7
Э	Э11				Э22									
С		С12					С24							
К						К23								

Оборудование со структурой Э11 состоит из одной кинематической группы формообразования создающее одноэлементарное исполнительное движение формообразования. Примером такой структуры является структура протяжного станка, имеющего дополнительную кинематическую группу деления. На рис. 3.1.1 показана кинематическая группа с рассматриваемой структурой.

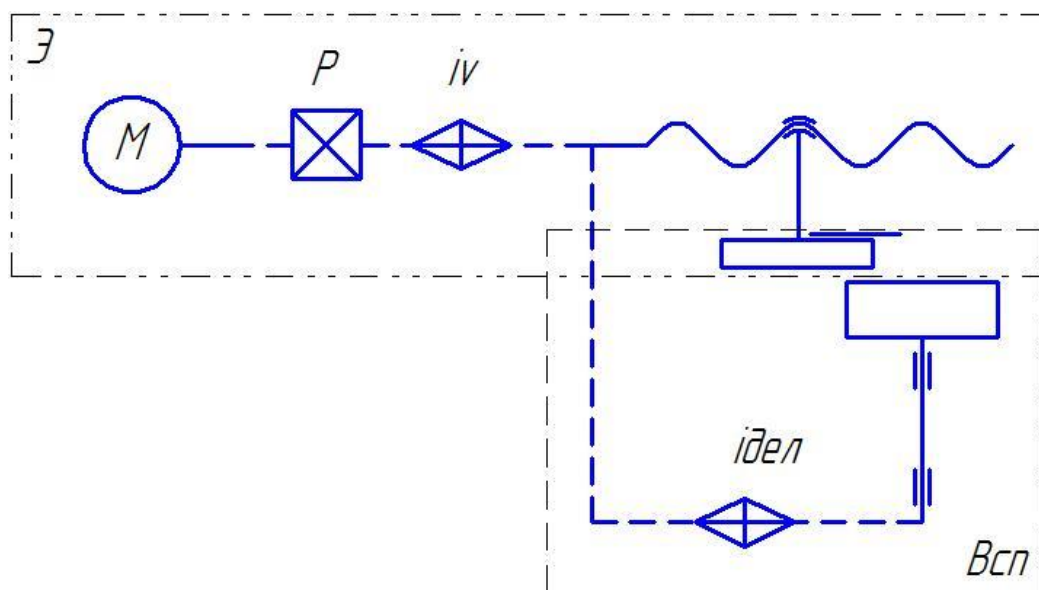


Рисунок 3.1.1. - Кинематическая структура оборудования со структурой Э11

Оборудование со структурой Э22 состоит из двух кинематических групп формообразования каждая из которых создает одноэлементарное исполнительное движение формообразования. Такую структуру имеет фрезерное оборудование, состоящее из двух групп формообразования: группа вращения фрезы, группа продольного перемещения стола (см. рис.3.1.2). В данной структуре необходима дополнительная кинематическая группа деления.

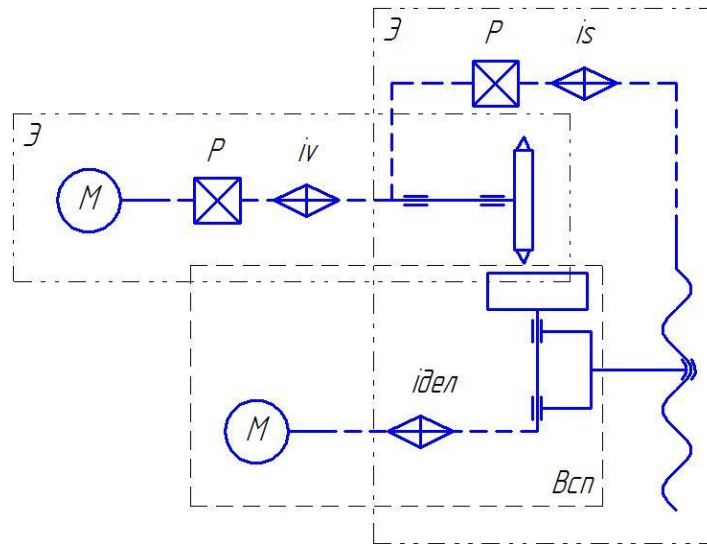
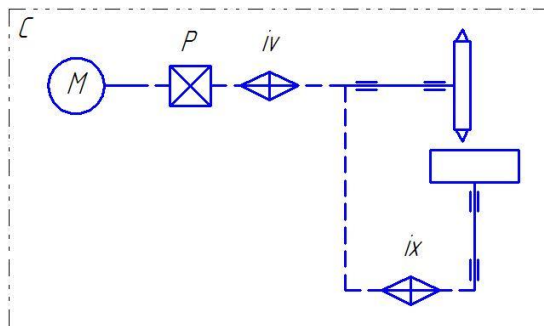
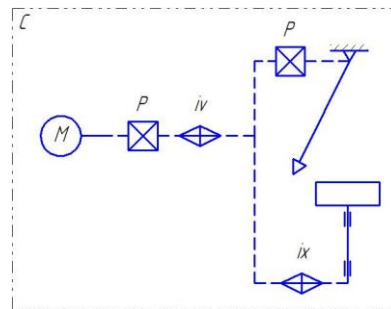


Рисунок 3.1.2. - Кинематическая структура оборудования со структурой Э22

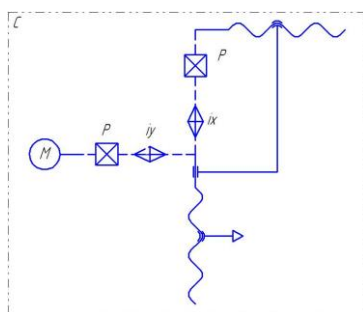
Оборудование со структурой С12 состоит из одной кинематической группы формообразования, создающее одно сложное двухэлементарное движение формообразования. Такую структуру имеет специальное оборудование, для обработки зубчатых контуров на торце состоящее из одной группы формообразования образованное двумя согласованными элементарными вращательными движениями инструмента и заготовки, имеющего дополнительную кинематическую группу врезания (рис. 3.1.3 д). При переносе функции врезания на геометрию инструмента структура оборудования примет вид представленного на рис. 3.1.3 а.



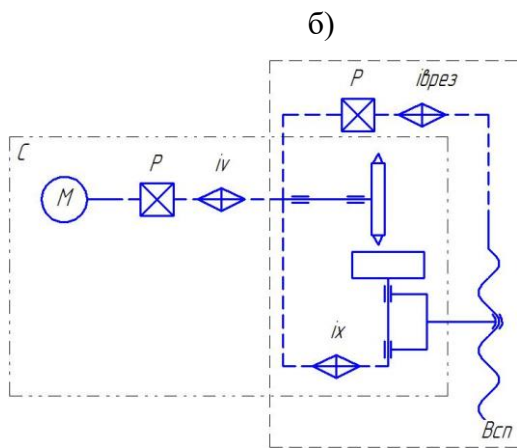
а)



в)



г)



д)

Рисунок 3.1.3. - Кинематическая структура оборудования со структурой С12

Такой же структурой характеризуется оборудование с энергетическим лучом для обработки: конических зубчатых контуров (рис. 3.1.3 в), цилиндрических зубчатых контуров (рис. 3.1.3 б, г).

Оборудование со структурой К23 состоит из двух кинематических групп формообразования, создающих одно сложное двухэлементарное и одноэлементарное движения формообразования. Такую структуру имеет зубофрезерное оборудование, для обработки зубчатых колес состоящее из групп формообразования образованное двумя согласованными элементарными вращательными движениями инструмента и заготовки, а также формообразующей группы подачи.

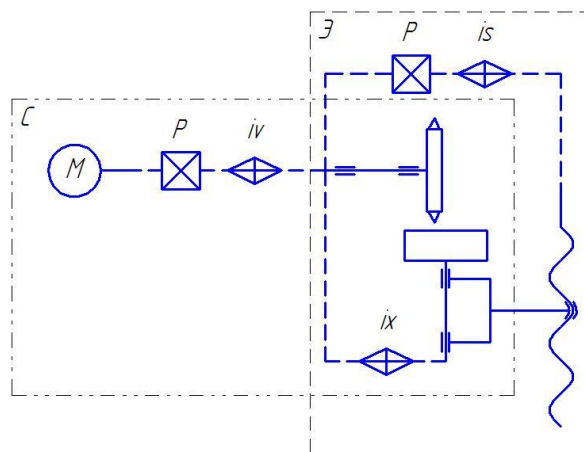


Рисунок 3.1.4. - Кинематическая структура оборудования со структурой К23

Оборудование со структурой С24 состоит из двух кинематических групп формообразования, создающих два сложных двухэлементарных движения формообразования. Такую структуру имеет зубофрезерное оборудование, для обработки косозубых зубчатых колес.

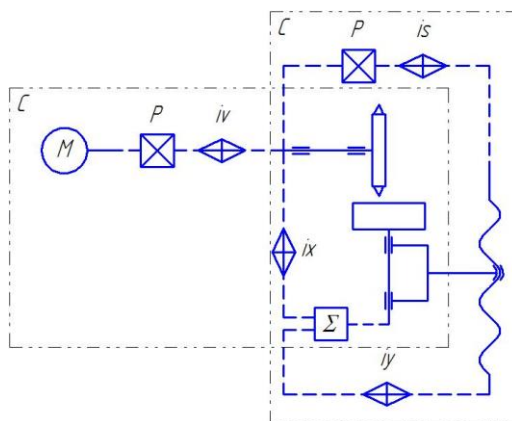


Рисунок 3.1.5. - Кинематическая структура оборудования со структурой C24

При составлении и анализе кинематической структуры станков следует четко представлять себе изделие в целом и те его поверхности, которые должны быть обработаны - это означает, что обрабатываемую поверхность необходимо охарактеризовать как в поперечном, так и в продольном сечениях, т.е. установить соответствующие производящие линии, при относительном движении которых может быть образована данная поверхность. Кинематическая структура оборудования определяет технологические возможности в плане возможностей геометрии формообразования. Выявление универсальной кинематической структуры с наименьшим количеством кинематических групп обосновывает выбор оптимальной структуры оборудования.

Проведем анализ технологических возможностей оборудования имеющего одинаковую кинематическую структуру C12 на примере обработки зубчатого контура с узким венцом, классифицируя геометрию по поверхности его расположения (цилиндр, плоскость, конус), согласно рис. 3.1.3.

Таблица 3.1.2. - Технологические возможности оборудования с кинематической структурой C12

Классификатор кинематической структуры	Геометрия зубчатого контура		
	цилиндр	плоскость	конус
C12a	+	+	+
C12б	+	-	-
C12в	-	-	+
C12г	+	-	-
C12д	+	+	+

3.2 Параметрическая оптимизация компонентов формообразующей системы станочного оборудования для обработки изделий с зубчатым контуром

Параметрическая оптимизация компонентов формообразующей системы направлена на определение значений управляемых параметров системы станочного оборудования, наилучших с позиций производительности, технологичности и универсальности.

Разработка формообразующих систем относится к такой категории проектной деятельности, которая непосредственно определяет конечный результат не зависимо от правильности принятия решений на всех остальных этапах проектирования. При этом, в числе решаемых проектных задач, важное место занимает выбор компонентов станочного оборудования и их взаимосвязь. В современной проектной практике, при выборе формообразующей системы обычно руководствуются своими профессиональными знаниями и профессиональной интуицией. Такой подход привлекателен высокой оперативностью принятия решений, а также тем, что результат выбора, характеризуется достаточно высокой рациональностью. Недостатком такого подхода является неформализованность выбора. В этой связи, весьма актуальной представляется проблема формализации процесса выбора компонентов формообразующей системы с помощью оптимизационных методологий.

Рациональный выбор компонентов формообразующей системы при проектировании систем станочного оборудования оказывает решающее влияние на эффективность разрабатываемых проектных решений. В настоящее время нет методологии параметрической оптимизации формообразующих систем, а процесс проектирования не располагает механизмом формализованного выбора оптимального варианта, наличие которого является одним из необходимых условий результативности и перспективности разработки.

Рассмотрим один из возможных вариантов общего подхода к решению проблемы параметрической оптимизации. При этом, учитывая масштабность рассматриваемой темы, в настоящей работе рассматривается только один из её фрагментов, ограниченный следующими условиями:

- отрасль производства – машиностроение;
- тип производства – мелкосерийный или среднесерийный;
- метод технологического процесса – механическая обработка;
- объект исследования – станочного оборудования для обработки изделий с зубчатым контуром;
- группа оптимизируемых характеристик станка – технологические ресурсы;

- инструмент принятия решения – параметрическая оптимизация компонентов формообразующей системы.

Процедура параметрической оптимизации компонентов формообразующей системы, по своей сути, может рассматриваться, как одно из практических приложений общей теории принятия решений, которая основывается на применении оптимизационных подходов к выбору рационального варианта из множества рассматриваемых вариантов. В этой связи, анализ проблемы сравнительной оценки станочного оборудования предполагает рассмотрение следующих вопросов:

1. Анализ параметрического описания компонентов формообразующей системы станочного оборудования.
2. Постановка оптимизационных критериев выбора.
3. Формирование процедуры выбора предпочтительной структуры станочного оборудования для обработки изделий с зубчатым контуром.

По результатам параметрической оптимизации компонентов формообразующей системы станочного оборудования для обработки изделий с зубчатым контуром выбрано оборудование со структурой K23 состоящее из двух кинематических групп формообразования, создающих одно сложное двухэлементарное и одноэлементарное движения формообразования. Такую структуру имеет зубофрезерное оборудование, для обработки зубчатых колес состоящее из групп формообразования образованное двумя согласованными элементарными вращательными движениями инструмента и заготовки, а также формообразующей группы подачи.

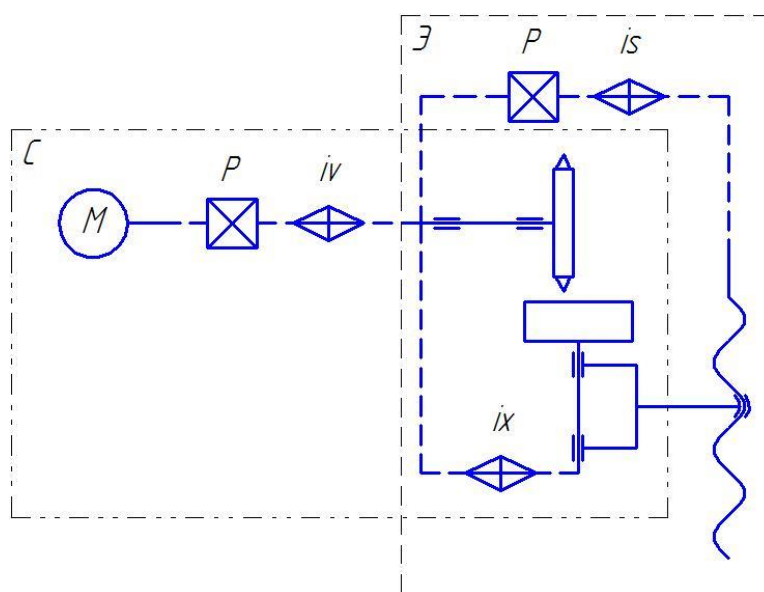


Рисунок 3.2.1. - Кинематическая структура оборудования со структурой K23

В качестве оптимизационных критериев выбора выступали технологическая универсальность, гибкость и производительность станочного оборудования для обработки изделий с зубчатым контуром.

Реализуемые, при данной кинематической структуре оборудования, схемы формообразования представлена на рис. 3.2.2 и рис. 3.2.3.

Обработку пазов на цилиндрической поверхности заготовки 1 осуществляют инструментом 2. Плоскость его вращения устанавливают под определенным углом μ к оси вращения заготовки, а расстояние между осями инструмента и заготовки задают равным H (см. рис 3.2.1).

В процессе обработки детали 1 и инструменту 2 сообщают согласованные вращательные движения B_1 и B_2 соответственно с частотами n_1 и n_2 . Отношение частот n_2 и n_1 задают пропорциональным числом обрабатываемых пазов и обратно пропорциональным числом пропускаемых пазов:

$$i = \frac{n_2}{n_1} = \frac{\omega_2}{\omega_1} = \frac{m}{p}, \quad (3.2.1)$$

где n_1 – частота вращения заготовки;

n_2 – частота вращения инструмента;

m - число обрабатываемых пазов,

p - число пропускаемых пазов.

Для получения заданной длины пазов инструменту сообщают поступательное перемещение P_3 вдоль оси вращения заготовки.

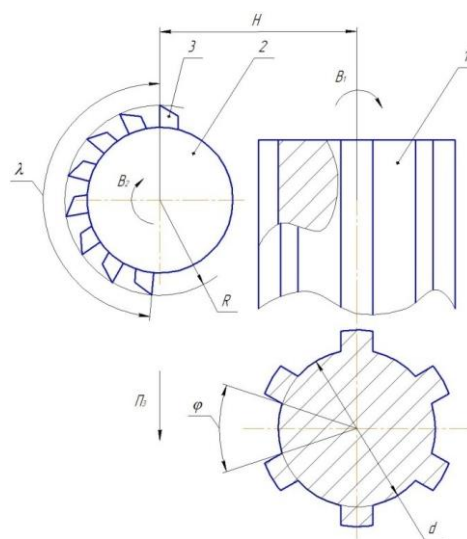


Рисунок 3.2.2. - Схема формообразования поверхностей с зубчатым контуром

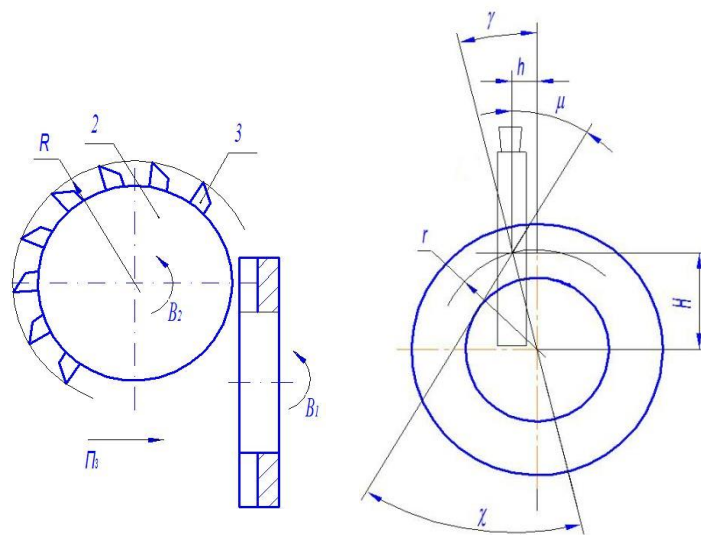


Рисунок 3.2.3. - Схема формообразования поверхностей с зубчатым контуром

Инструмент для обработки пазов на торцах деталей содержит режущие элементы, расположенные в угловом секторе λ , величина которого определяют из соотношения:

$$\lambda = \frac{\varphi m}{p}, \quad (3.2.2)$$

где φ - угловая ширина паза по внутреннему диаметру детали;

m - число обрабатываемых пазов;

p - число пропускаемых пазов.

Для обработки пазов детали и инструменту сообщают согласованные вращательные движения вокруг скрещивающихся под углом μ осей:

$$\mu = \arccos \frac{\sqrt{R^2 - \left(\frac{dp}{2m}\right)^2}}{R} \mp \beta \quad (3.2.3)$$

где R – радиус инструмента;

d – диаметр заготовки;

β – угол наклона винтового паза относительно оси заготовки;

и относительное движение подачи вдоль оси вращения детали, при этом каждый паз формируют по ширине последовательно за несколько резов.

Обработку пазов на торце заготовки 1 (рис.3.2.3) осуществляют инструментом 2. Плоскость его вращения устанавливают на определенном расстоянии h от оси вращения заготовки, а расстояние между осями инструмента и заготовки задают равным H .

В процессе обработки детали 1 и инструменту 2 сообщают согласованные вращательные движения V_1 и V_2 соответственно с частотами n_1 и n_2 . Отношение частот n_2 и n_1 задают пропорциональным числом обрабатываемых пазов и обратно пропорциональным числом пропускаемых пазов.

Конструктивная схема инструмента для обработки пазов на торцах деталей представляет собой режущие элементы 3 расположенные в угловом секторе, величина λ которого определяется по формуле

$$\lambda = \frac{\varphi m}{p}, \quad (3.2.4)$$

где φ - угловая ширина паза по наружному диаметру заготовки.

Количество N режущих элементов определяется из неравенства

$$N \geq \frac{\varphi}{2 \arcsin\left(\frac{t}{D}\right)}, \quad (3.2.5)$$

где t – ширина одного из нескольких резцов, формирующих паз,

D – наружный диаметр заготовки.

Таким образом, при параметрической оптимизации формообразующего инструмента необходимо руководствоваться комплексным подходом к выбору его геометрии, что обусловлено идентичностью конструкции инструментов по рассматриваемым схемам формообразования.

3.3 Разработка компоновки и механики автоматизированного станочного оборудования для обработки изделий с зубчатым контуром

Станочное оборудование разнообразнее любых других технологических машин. Его различают по технологическому назначению и режущим инструментам, по размерам и типовым разновидностям, по системам управления и степени автоматизации и, кроме того, по компоновкам. Разнообразие компоновок является следствием не только множества технологических задач, размеров и форм обрабатываемых деталей, но и развития конструкций станков и способов обработки, причем в самом относительном характере движения формообразования заключено многообразие возможных вариантов движений заготовки и инструментов, а следовательно, и компоновок станков.

Особенно разнообразны компоновки специальных станков, однако типаж универсальных станков тоже непрерывно пополняется станками с новыми компоновками, существенно отличающимися от традиционных.

Традиционные компоновки фрезерных, расточных, токарных и других универсальных станков прошли долгий путь совершенствования в связи с необходимостью использования новых инструментов, расширения универсальности, повышения жесткости в связи с интенсификацией режимов резания.

Ряд новых компоновок универсальных станков появляется под воздействием и развитием программного управления, что прослеживается на примере появления сверлильные станки с крестовыми столами и т. д.

Развитие компоновок универсальных станков связано также с появлением многооперационных станков (обрабатывающих центров).

Поисковые исследования привели к появлению большого числа совершенно новых компоновок, наиболее полно отвечающих условиям выполнения на одном станке различных операций.

Повышение требований к качеству станков в связи с общим повышением точности в машиностроении, изготовлением деталей из труднообрабатываемых сплавов, появлением новых инструментальных материалов, а также совершенствование программного управления заставляет искать пути повышения качества компоновок как важного слагаемого качества станков.

Вместе с тем применение в станках отдельных приводов, в том числе с программным управлением, внедрение направляющих качения, гидростатических направляющих и других элементов конструкций открывает широкие возможности совершенствования традиционных и создания новых компоновок.

Но, несмотря на все это, есть основания считать, что формирование структуры компоновок большинства современных универсальных станков уже завершилось и в дальнейшем происходит только их усовершенствование.

В общем случае задача выбора компоновки станочного оборудования сводится к сравнению известных или предлагаемых компоновок по определенным признакам. Задача рационального выбора компоновки станочного оборудования осложняется тем, что существующие различия в общей архитектуре станка, взаимном расположении узлов и их относительных перемещениях слабо влияют на их возможности. Все известное станочное оборудование для обработки изделий с зубчатым контуром в пределах одного типа размера и класса точности практически не отличаются по составу и содержанию выполняемых операций. Если же такие различия и имеются, то они не связаны или слабо связаны с компоновкой.

Более важную роль в выборе компоновки имеют такие признаки, как удобство обслуживания рабочей зоны, ремонтпригодность, возможность встройки в автоматическую линию, возможность отвода стружки.

Поэтому гораздо актуальнее разработка компоновки и механики инструмента и оснастки позволяющей осуществлять различные схемы формообразования на оборудовании с различной компоновкой, либо осуществлять обработку поверхностей различной геометрии.

Рассмотрим компоновку и кинематику инструмента в котором ему помимо вращательного движения, сообщают дополнительное сложное движение по средствам эксцентрика (рис. 3.3.1), причем вращение последнего связано с первым. На рисунке точка O является центром вращения эксцентрика, точка A - центр вращения инструмента. Параметр e - эксцентриситет, R - радиус инструмента.

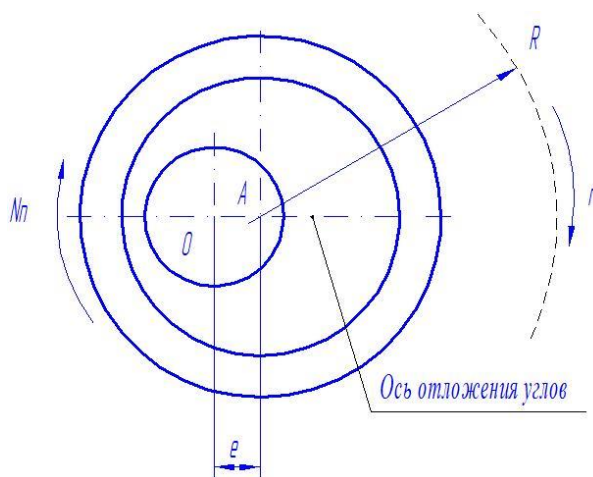


Рисунок 3.3.1. - Схема инструмента для обработки изделий с зубчатым контуром

Траектория движения

Определимся с начальным положением составных частей механизма:

1. Угол поворота инструмента - 0 (см. рис.3.3.1)
2. Угол поворота эксцентрика - 180 (см. Рис.3.3.1)

При повороте инструмента на угол α , точке режущей кромки добавляется перемещение от эксцентрика.

Рассмотрим схему обработки на модели (рис.3.3.2.). Из рисунка видно что:

$$\begin{cases} x = R\cos\alpha - e\cos(N\alpha) \\ y = R\sin\alpha - e\sin(N\alpha) \end{cases} \quad (3.3.1)$$

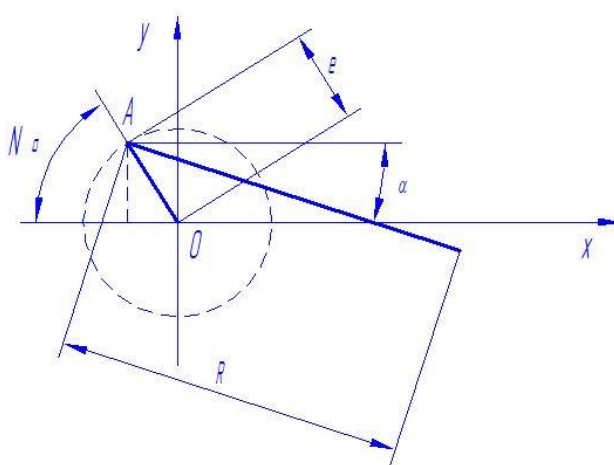


Рисунок 3.3.2. - Модель обработки

Используя полученное уравнение строим траекторию точки принадлежащей режущей кромке резца (рис.3.3.3.) со следующими параметрами $R=70$, $e=5$, $N=4$.

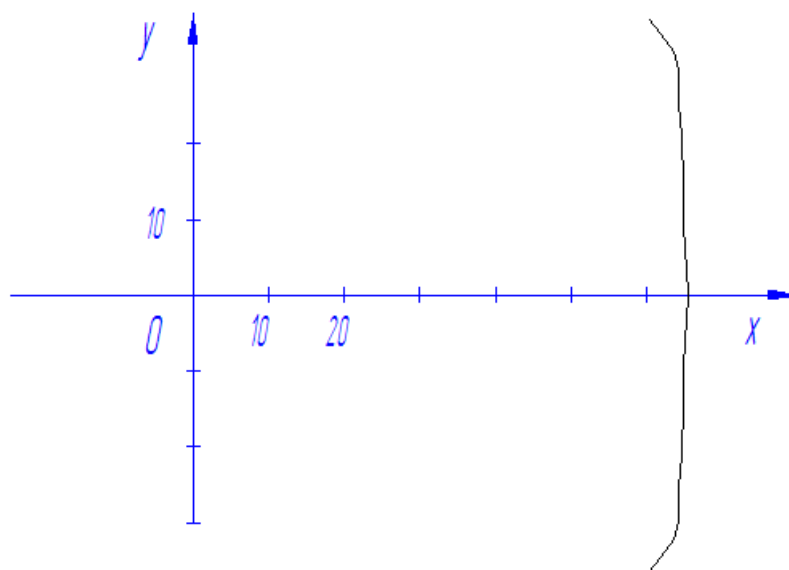


Рисунок 3.3.3. - Траектория режущей кромки

Произведем решение обратной задачи по определению достаточного эксцентриситета e , при следующих известных параметрах:

1. Ширина обрабатываемого венца - 20 мм,
2. Отклонение от прямолинейности дна паза - 0.2 мм,
3. Отношение частот вращений инструмента и эксцентрика - 4,
4. Радиус инструмента - 70 мм.

Зададимся запасом по ширине обрабатываемого венца на обе стороны 6 мм.

$$\Delta x = x_1 - x_2$$

$$x_1 = R - e$$

$$x_2 = R \cos \alpha - e \cos(N \alpha)$$

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{y}{R}\right)$$

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{13}{70}\right) = 10.703^\circ$$

$$x_1 = 70 - e$$

$$x_2 = 70 \cos(10.703^\circ) - e \cos(42.811^\circ) = 68.7822 - e 0.7336$$

$$0.2 = 1.2177 - e 0.2664$$

$$e = 3.820182$$

3.4 Режимы обработки

Рассматриваемая схема обработки по кинематике в момент формирования паза ближе всего к строганию и фрезерованию. Поэтому расчет режимов резания будем производить опираясь на справочные данные по этим процессам.

Фактическая скорость резания определяется геометрической суммой окружных скоростей эксцентрика V_1 и инструмента V_2 (рис.3.4.1):

$$\dot{V} = \dot{V}_1 + \dot{V}_2$$
$$V^2 = V_1^2 + V_2^2 - 2V_1V_2 \cos(N\alpha - \alpha) \quad (3.4.1)$$

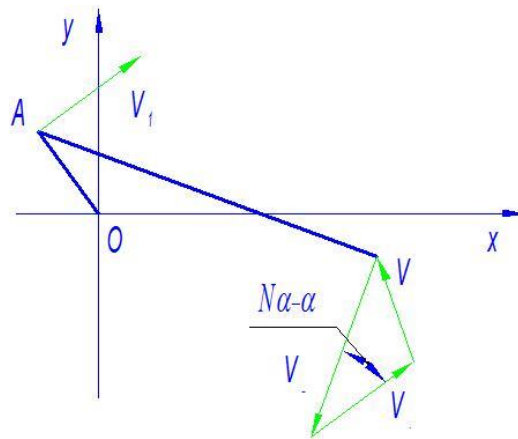


Рисунок 3.4.1. - Схема скоростей

Из формулы видно, что режущая кромка получает наибольшую скорость в процессе на перифериях венца.

Частота вращения инструмента:

$$n = \frac{V}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{N^2 \cdot e^2 + R^2 - 2 \cdot e \cdot N \cdot R \cdot \cos(N\alpha - \alpha)}} \quad (3.4.2)$$

Задаемся обрабатываемым материалом, конструкционная сталь, режимы резания выбираем по справочнику /1, т.3, с.364/:

Глубина резания 0.12 мм.

Ширина реза определяется параметрами паза 4 мм.

Скорость резания:

1. Обработка резцами с твердым сплавом 80 м/мин,
2. Обработка резцами из быстрорежущей стали 60 м/мин.

Наибольшая частота вращения инструмента соответствует обработке твердым сплавом:

$$n = \frac{80 \cdot 1000}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{4^2 \cdot 4^2 + 70^2 - 2 \cdot 4 \cdot 4 \cdot 70 \cdot \cos(4 \cdot 10.704 - 10.704)}} = 223 \text{ об/мин}$$

Частота вращения эксцентрика:

$$n_{\odot} = 223 \cdot 4 = 892 \text{ об/мин}$$

Силы резания

Произведем расчет составляющих сил резания как для строгания:

$$P_{y,z} = 10 C_p t^x s^y v^n K_p$$

Определяем значение коэффициентов /2, т.2, с.237, табл.22/:

1. Для P_z

$$C_p = 408, x = 0.72, y = 0.8, n = 0$$

2. Для P_y

$$C_p = 173, x = 0.73, y = 0.67, n = 0$$

Поправочный коэффициент принимаем одинаковым для расчета сил $K_p = 1$.

Подставляя коэффициенты получим:

$$P_y = 10 \cdot 173 \cdot 0.12^{0.73} \cdot 4^{0.67} \cdot 1 \cdot 1 = 9315981 \text{ Н}$$

$$P_z = 10 \cdot 408 \cdot 0.12^{0.72} \cdot 4^{0.8} \cdot 1 \cdot 1 = 2687.3154 \text{ Н}$$

Мощность резания:

$$N = \frac{P_z V}{1020 \cdot 60} = \frac{2687.3154 \cdot 80}{1020 \cdot 60} = 3.5 \text{ кВт}$$

Кинематический расчет

Этот расчет включает: определение передаточных чисел и чисел зубьев колес.

Кинематическая схема приспособления представлена на рис.3.4.2.

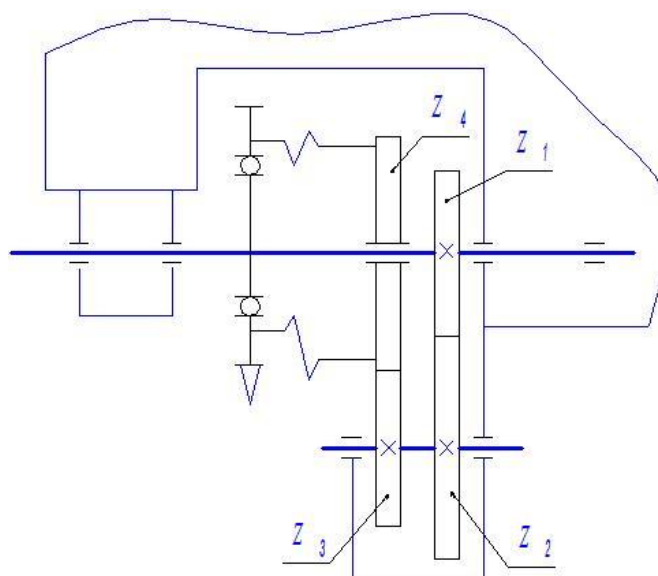


Рисунок 3.4.2. - Кинематическая схема приспособления

Зубчатые колеса должны удовлетворять следующим требованиям:

$$z_1 + z_2 = z_4 + z_3$$

$$\frac{z_2}{z_1} \cdot \frac{z_4}{z_3} = 4$$

Принимаем передаточное отношение между z_2, z_1 и z_4, z_3 одинаковым, тогда:

$$\frac{z_2}{z_1} = \frac{z_4}{z_3} = 2$$

Задаемся числом зубьев у колеса $z_4=70$, тогда $z_1=z_3=35, z_2=70$.

Представленные предварительные расчеты показывают возможность осуществимости инструмента дополняющего своей кинематикой и компоновкой универсальное станочное оборудование расширяя его технологические возможности.

4 ОПРЕДЕЛЕНИЕ УГЛОВ СКОРОСТИ РЕЗАНИЯ И ПОДАЧИ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ РЕЗЦОВЫХ ГОЛОВОК ДЛЯ СПОСОБА ОБРАБОТКИ С ПАРАЛЛЕЛЬНЫМИ ОСЯМИ ИНСТРУМЕНТА И ЗАГОТОВКИ

4.1 Постановка задачи

Кинематическое формирование торцового зубчатого контура (ТЗК) обеспечивается двухэлементарным исполнительным движением, образованным двумя согласованными вращательными движениями производящего контура вокруг параллельных осей. Режущим инструментом является резцовая головка 2 (рис. 4.1.1) с расположенными на торце режущими зубьями 4, при сообщении ей вращательного движения B_2 вокруг оси 3, параллельной оси вращения заготовки 5. При обработке заготовке 1 сообщают вращательное движение B_1 , а инструменту – движение врезания P_3 вдоль оси вращения заготовки. Расстояние между осями 3 и 5 равно L . В относительном движении траектория точки, совершающей два вращательных движения, представляет собой циклоидальную кривую, описываемую системой уравнений:

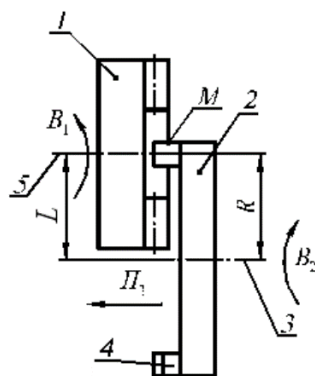


Рисунок 4.1.1. - Схема с параллельными осями инструмента и заготовки

$$\begin{cases} x = L\cos(\alpha) - R\cos(\alpha(i - 1)) \\ y = L\sin(\alpha) + R\sin(\alpha(i - 1)) \end{cases} \quad (4.1.1)$$

где x, y – текущие координаты траектории, формируемой производящими элементами резцовой головки в прямоугольной системе координат с центром на оси вращения заготовки; L – расстояние между осями резцовой головки и заготовки; R – радиус резцовой головки; α – текущее значение угла поворота заготовки (параметр зависящий от времени); i – отношение частот вращательных движений резцовой головки и заготовки.

В случае, когда частота вращения инструмента больше, чем заготовки.

Критерием для рассмотрения кинематики и геометрии процесса получения пазов на торцах деталей является соотношение:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{n_1 R_{\text{и}}}{n_2 R_3} = i \frac{R_{\text{и}}}{R_3},$$

т.е. $\frac{V_1}{V_2} = i \frac{R_{\text{и}}}{R_3}$, таким образом соотношение окружных скоростей заготовки и инструмента будет:

$$V_1 = V_2 i \frac{R_{\text{и}}}{r_3} \quad (4.1.2)$$

Где

V_1 —окружная скорость инструмента; V_2 —окружная скорость заготовки; n_1 —частота вращения инструмента; $R_{\text{и}}$ —радиус расположения рассматриваемой точки режущей кромки; n_2 —частота вращения заготовки; R_3 — наибольший радиус заготовки; i — передаточное число.

Возможны следующие варианты соотношения

1) $\frac{V_1}{V_2} = 1$ – в этом случае скорость главного движения резания может быть рассмотрена как геометрическая сумма движений вращения заготовки и инструмента.

2) $\frac{V_1}{V_2} > 1$, т.е. скорость вращательного движения режущего инструмента больше, чем скорость заготовки в процессе резания. В этом случае главное движение D_2 – вращение инструмента, а вращение заготовки—движение подачи D_s .

3) $\frac{V_1}{V_2} < 1$, т.е. скорость вращательного движения заготовки больше, чем скорость инструмента в процессе резания. В этом случае главное движение D_2 –вращение заготовки, а вращение инструмента—движение подачи D_s .

При рассмотрении кинематики движения точки режущей кромки положение точки режущей кромки по отношению к оси вращения не меняется, а следовательно и окружная скорость остается величиной постоянной. Положение обрабатываемой точки по длине паза изменяется, при этом изменяется ее положение относительно оси вращения заготовки, а следовательно изменяется окружная скорость вращения. Наибольшее значение окружной скорости точки заготовки будет наблюдаться при ее наибольшем удалении от центра вращения заготовки и наоборот.

Рассмотрим случай, когда $\frac{V_1}{V_2} > 1$, а направления движений инструмента и заготовки –однонаправленное.

В этом случае главное движение D_2 –вращение инструмента, а вращение заготовки—движение подачи D_s . Схема движения представлена на рисунке 4.1.1.

4.2 Угол скорости резания и угол подачи при дискретном задании подачи резания

Из параллелограмма векторов $A_1A_3O_2A_4$ (рис. 4.2.1) следует:

$$V_e = \sqrt{V^2 + V_s^2}, \quad (4.2.1)$$

где V_e —вектор скорости результирующего движения резания; V —вектор скорости главного движения; V_s —вектор скорости движения подачи.

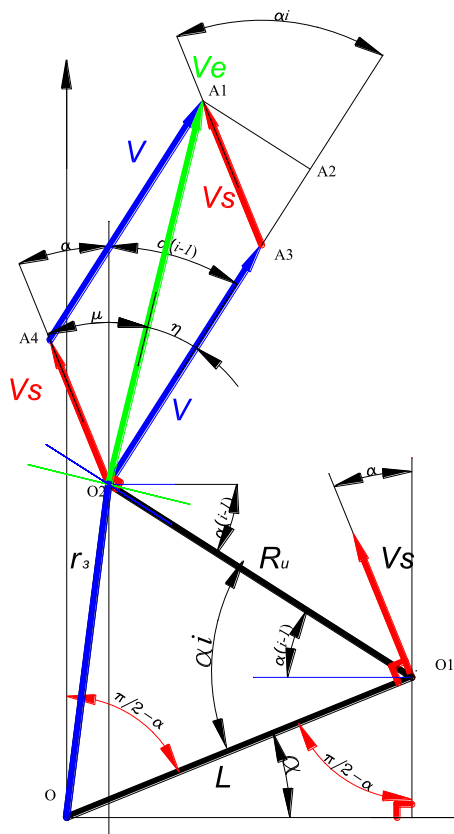


Рисунок 4.2.1 - Схема вращения инструмента и заготовки при однонаправленном вращении и $V_1/V_2 > 1$ (4.2.1)

Подставим в (4.2.1) ур-е (4.1.2) и получим:

$$V_e = \sqrt{V^2 + V_s^2} = \sqrt{\left(V_s i \frac{R_u}{r_3}\right)^2 + V_s^2} = V_s \sqrt{\left(i \frac{R_u}{r_3}\right)^2 + 1} \quad (4.2.2)$$

Где V_e —Скорость результирующего движения резания; V_s —Скорость движения подачи (вращение заготовки); V —Скорость главного движения резания (вращение инструмента); r_3 —расстояние от рассматриваемой точки на заготовке до оси вращения заготовки.

Угол скорости резания η – Угол в рабочей плоскости между направлениями скоростей результирующего движения резания и главного движения резания. При этом **рабочая плоскость** пройдет через направления скоростей главного движения резания и движения подачи, т.е. в плоскости листа.

Из схемы (рис. 4.2.1) следует:

$$\cos(\eta) = \frac{V + V_S \cos(\alpha i)}{V_e} \quad (4.2.3)$$

$$\cos(\alpha i) = \frac{L^2 + R^2 - r^2}{2LR} \quad (4.2.4)$$

Подставим (4.2.4) в (4.2.3) и получим:

$$\cos(\eta) = \frac{V + V_S \left(\frac{L^2 + R^2 - r^2}{2LR} \right)}{V_e} \quad (4.2.5)$$

С учетом (2), а также $V_e = V_S \sqrt{\left(i \frac{R_H}{r_3} \right)^2 + 1}$ равенство (4) примет вид:

$$\cos(\eta) = \frac{V_S i \frac{R_H}{r_3} + V_S \left(\frac{L^2 + R_H^2 - r_3^2}{2LR_H} \right)}{V_S \sqrt{\left(i \frac{R_H}{r_3} \right)^2 + 1}} \quad (4.2.6)$$

или

$$\cos(\eta) = \frac{i \frac{R_H}{r_3} + \frac{L^2 + R_H^2 - r_3^2}{2LR_H}}{\sqrt{\left(i \frac{R_H}{r_3} \right)^2 + 1}} \quad (4.2.7)$$

Или

$$\cos(\eta) = \frac{2LiR_H^2 + r_3(L^2 + R_H^2 - r_3^2)}{2LR_H r_3 \sqrt{\left(i \frac{R_H}{r_3} \right)^2 + 1}} \quad (4.2.8)$$

Из равенства (8) угол скорости резания определяется:

$$\eta = \arccos \left(\frac{2LiR_H^2 + r_3(L^2 + R_H^2 - r_3^2)}{2LR_H r_3 \sqrt{\left(i \frac{R_H}{r_3} \right)^2 + 1}} \right) \quad (4.2.9)$$

Угол подачи μ (рис.4.2.1) можно определить из соотношения:

$$\mu + \eta = \alpha + \alpha(i - 1) = \alpha i \quad (4.2.10)$$

$$\mu = \alpha i - \arccos \left(\frac{2LiR_H^2 + r_3(L^2 + R_H^2 - r_3^2)}{2LR_H r_3 \sqrt{\left(i \frac{R_H}{r_3} \right)^2 + 1}} \right) \quad (4.2.11)$$

Если подставить в (4.2.10) равенство (4.2.6), после преобразований, и $\alpha i = \arccos \left(\frac{L^2 + R^2 - r^2}{2LR} \right)$ то угол подачи будет определяться:

$$\mu_d = \arccos \left(\frac{L^2 + R_H^2 - r_3^2}{2LR_H} \right) - \arccos \left(\frac{2LiR_H^2 + r_3(L^2 + R_H^2 - r_3^2)}{2LR_H r_3 \sqrt{\left(i \frac{R_H}{r_3} \right)^2 + 1}} \right) \quad (4.2.12).$$

4.3 При непрерывном задании подачи резания

При непрерывном задании движения врезания результирующее движение подачи будет определяться взаимной ориентацией векторов приведенной на рис.4.3.1.

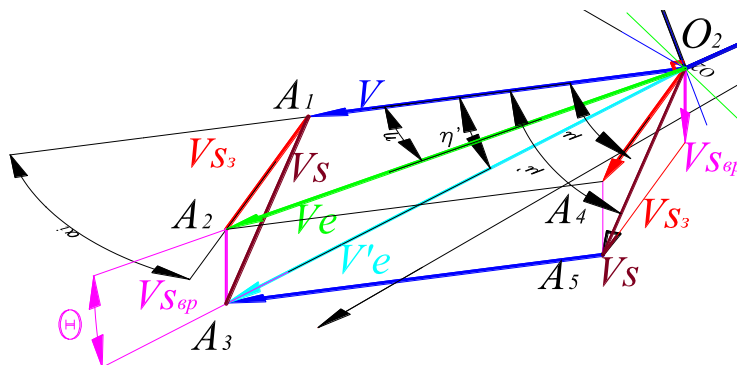


Рисунок 4.3.1 - Схема ориентации векторов точки режущего лезвия при наличии непрерывного движения врезания

V_{S3} – Скорость движения подачи заготовки (вращение заготовки)

$V_{Sвр}$ – Скорость движения подачи врезания (вращение заготовки)

В этом случае движение подачи определяется по формуле:

$$V_s = \sqrt{V_{S3}^2 + V_{Sвр}^2}, \quad (4.3.1)$$

А вектор скорости результирующего движения резания по формуле:

$$V_e = \sqrt{V^2 + V_{S3}^2 + V_{Sвр}^2} \quad (4.3.2)$$

В этом случае положение рабочей плоскости изменяется по отношению к случаю дискретного движения подачи:

1. Положение вектора скорости главного движения V остается как и в прежнем случае в плоскости OXY .
2. Вектор подачи заготовки V_{S3} остается как и в прежнем случае в плоскости OXY .
3. Вектор подачи врезания $V_{Sвр}$ расположен в плоскости нормальной к плоскости в которой расположены вектора V и V_{S3} , т.е. OXY . Его наличие и вызывает изменение положения вектора подачи и положение рабочей плоскости по отношению к случаю с дискретной подачей.

Угол направления вектора подачи по отношению к плоскости OXY θ_{sx} ($\angle A_4 O_2 A_5$) будет определяться из соотношения:

$$tg(\theta_{sx}) = \frac{V_{sBP}}{V_{s3}}, \quad (4.3.3)$$

и равен:

$$\theta_{sx} = arctg\left(\frac{V_{sBP}}{V_{s3}}\right). \quad (4.3.4)$$

Угол между вектором результирующего движения резания с подачей врезания и вектором результирующего движения резания с дискретной подачей (без подачи врезания) θ можно определить по формуле:

$$\theta = arctg\left(\frac{V_{sBP}}{V_e}\right) = arctg\left(\frac{V_{sBP}}{\sqrt{V^2 + V_{s3}^2 + V_{sBP}^2}}\right) \quad (4.3.5),$$

При этом:

$$V'_e = \frac{V_e}{\cos\theta}. \quad (4.3.6)$$

4.4 Определение угла скорости резания η' при непрерывной подаче врезания

Рассмотрим $\triangle O_2A_1A_2$.

$$V_{S3}^2 = V^2 + V_e^2 - 2VV_e \cos(\eta) \quad (4.4.1)$$

Рассмотрим треугольник $\triangle O_2A_1A_3$.

$$V_s^2 = V^2 + V_e'^2 - 2VV_e' \cos(\eta') \quad (4.4.2)$$

Рассмотрим треугольник $\triangle A_1A_2A_3$ - он прямоугольный

$$V_{SBP}^2 = V_s^2 - V_{S3}^2 \quad (4.4.3)$$

Подставим в правую часть ур-я (4.4.3) равенства 1,2 и преобразуем

$$\begin{aligned} V_s^2 &= V^2 + V_e'^2 - 2VV_e' \cos(\eta') \\ V_{S3}^2 &= V^2 + V_e^2 - 2VV_e \cos(\eta) \\ V_{SBP}^2 &= V_s^2 - V_{S3}^2 = V_e'^2 - V_e^2 - 2V(V_e' \cos(\eta') - V_e \cos(\eta)) \end{aligned} \quad (4.4.4)$$

Рассмотрим треугольник $\triangle O_2A_2A_3$ - он прямоугольный

$$V_{SBP}^2 = V_e'^2 - V_e^2 \quad (4.4.5)$$

Подставим в ур-е (4.4.5) в левую часть (4.4.4) правую часть и получим:

$$\begin{aligned} V_e'^2 - V_e^2 &= V_e'^2 - V_e^2 - 2V(V_e' \cos(\eta') - V_e \cos(\eta)) \\ 0 &= -2V(V_e' \cos(\eta') - V_e \cos(\eta)) \\ 0 &= V_e' \cos(\eta') - V_e \cos(\eta) \\ V_e' \cos(\eta') &= V_e \cos(\eta) \end{aligned} \quad (4.4.6)$$

$$\frac{V_e'}{V_e} = \frac{\cos(\eta)}{\cos(\eta')}, \quad (4.4.7)$$

$$\cos(\eta') = \frac{V_e \cos(\eta)}{V_e'}, \quad (4.4.8)$$

С учетом $V_e' = \frac{V_e}{\cos\theta}$, (4.4.8) примет вид:

$$\begin{aligned} \cos(\eta') &= \frac{V_e \cos(\eta)}{V_e'} = \frac{V_e \cos(\eta)}{\frac{V_e}{\cos\theta}} = \cos(\eta) \cos\theta \\ \cos(\eta') &= \cos(\eta) \cos\theta \end{aligned} \quad (4.4.9).$$

Зависимость (4.4.9) с учетом угла скорости резания без подачи врезания или при дискретном ее задании

$$\eta = \arccos \left(\frac{2LiR_n^2 + r_3(L^2 + R_n^2 - r_3^2)}{2LR_n r_3 \sqrt{\left(i \frac{R_n}{r_3}\right)^2 + 1}} \right), \theta = \arctg \left(\frac{V_{SBP}}{V_e} \right) = \arctg \left(\frac{V_{SBP}}{\sqrt{V^2 + V_{S3}^2 + V_{SBP}^2}} \right),$$

Будет иметь вид:

$$\cos(\eta') = \frac{2LiR_n^2 + r_3(L^2 + R_n^2 - r_3^2)}{2LR_n r_3 \sqrt{\left(i \frac{R_n}{r_3}\right)^2 + 1}} \cos \left(\arctg \left(\frac{V_{SBP}}{\sqrt{V^2 + V_{S3}^2 + V_{SBP}^2}} \right) \right)$$

4.5 Определение угла подачи μ' при непрерывном движении подачи врезания

Рассмотрим треугольник $\triangle O_2A_1A_4$ (рис.4.3.1). Из рис.4.3.1 видно, что

$$A_1A_4^2 = V^2 + V_{S_3}^2 - 2VV_{S_3}^2 \cos(\eta + \mu).$$

В соответствии с рис.3 из $\triangle O_2A_1A_5$,

$$A_1A_5^2 = V^2 + V_S^2 - 2VV_S^2 \cos(\eta' + \mu').$$

Треугольник $\triangle A_1A_4A_5$ –прямоугольный, следовательно:

$$A_1A_5^2 - A_1A_4^2 = V_{\text{свп}}^2.$$

Т.е.

$$A_1A_5^2 = V^2 + V_S^2 - 2VV_S^2 \cos(\eta' + \mu')$$

$$A_1A_4^2 = V^2 + V_{S_3}^2 - 2VV_{S_3}^2 \cos(\eta + \mu)$$

$$V_{\text{свп}}^2 = V_S^2 - V_{S_3}^2 - 2VV_S^2 \cos(\eta' + \mu') + 2VV_{S_3}^2 \cos(\eta + \mu)$$

$V_S^2 - V_{S_3}^2 = V_{\text{свп}}^2$ (подставим в правую часть и перенесем в левую сократим и получим)

$$2VV_S^2 \cos(\eta' + \mu') = 2VV_{S_3}^2 \cos(\eta + \mu) \text{ сократим } 2V$$

$$V_S^2 \cos(\eta' + \mu') = V_{S_3}^2 \cos(\eta + \mu) \text{ запишем}$$

$$\frac{\cos(\eta' + \mu')}{\cos(\eta + \mu)} = \frac{V_{S_3}^2}{V_S^2}$$

$$\cos(\eta' + \mu') = \frac{V_{S_3}^2}{V_S^2} \cos(\eta + \mu)$$

$$\eta' + \mu' = \arccos\left(\frac{V_{S_3}^2}{V_S^2} \cos(\eta + \mu)\right),$$

$$\mu' = \arccos\left(\frac{V_{S_3}^2}{V_S^2} \cos(\eta + \mu)\right) - \eta'$$

4.6 Угол подачи при профилировании путем дискретного изменения параметра L .

В случае, когда ведется профилирование путем дискретного изменения параметра L , инструменту сообщают движение D_{SL} – движение подачи оси инструмента относительно оси вращения заготовки направленное в направлении линии соединяющей оси вращения заготовки и инструмента. Движение D_{SL} характеризуется V_{SL} -вектором скорости движения. В случае дискретного изменения L возможны следующие варианты:

1. Подача осуществляется вне области резания. В этом случае происходит переход режущей кромки на новую траекторию. В пределах траектории
2. Подача осуществляется в области обработки

4.7 Угол подачи при профилировании путем непрерывного изменения параметра L

Пусть заготовка осуществляет движение подачи в направлении перпендикулярном к осям инструмента и заготовки в направлении межосевого расстояния (движение профилирования с изменяющимся параметром L). Оно характеризуется V_{SL} -вектором скорости движения подачи D_{SL} .

В случае дискретного задания D_{SL} , движение должно осуществляться на оборот заготовки, т.к. при выполнении одного оборота заготовки режущая кромка формирует полную траекторию циклоиды.

$$\begin{cases} x = L_{\alpha} \cos(\alpha) - R \cos(\alpha(i - 1)) \\ y = L_{\alpha} \sin(\alpha) + R \sin(\alpha(i - 1)) \end{cases}$$

Углы η', μ', μ, η определяются как и для вышеуказанных случаев при этом

$$L_{\alpha} = L_0 \pm f(\alpha)$$

При выполнении движения D_{SL} , возникает дополнительный вектор скорости подачи V_{SL} . Этот вектор лежит в плоскости XOY (при его пространственном положении в других отличных плоскостях его необходимо рассматривать совместно с добавочным вектором движения врезания). При этом вектор движения подачи заготовки для точки O_2 будет определяться по формуле:

$$V_{s3}^2 = V_{SL}^2 + V_{s3г.вращ.}^2$$

$V_{s3г.вращ.}$ - Скорость движения подачи заготовки в движении вращения (вращение заготовки); V_{SL} -вектор скорости подачи движения D_{SL} .

Вектор результирующего движения резания будет:

$$V_e = \sqrt{V^2 + V_{S3}^2} = \sqrt{V^2 + V_{SL}^2 + V_{S3\text{заг.вращ.}}^2} = \sqrt{V_{S3\text{заг.вращ.}}^2 \left(\left(i \frac{R_H}{r_3} \right)^2 + 1 \right) + V_{SL}^2}$$

Угол между Вектором V_{S3} и V определяется по соотношению:

$$ai \pm \alpha_{SL} = \mu + \eta,$$

где знак + берется в случае движения D_{SL} направленного вдоль OO_1 к центру вращения заготовки, а знак – при движении от центра вращения заготовки.

Угол

$$\alpha_{SL} = \arctg \left(\frac{V_{SL}}{V_{S3\text{заг.вращ.}}} \right)$$

$$ai \pm \arctg \left(\frac{V_{SL}}{V_{S3\text{заг.вращ.}}} \right) = \mu + \eta$$

$$\cos(\eta) = \frac{V + V_S \cos(ai \pm \alpha_{SL})}{V_e} = \frac{V + \sqrt{V_{SL}^2 + V_{S3\text{заг.вращ.}}^2} \cos \left(ai \pm \arctg \left(\frac{V_{SL}}{V_{S3\text{заг.вращ.}}} \right) \right)}{\sqrt{V^2 + V_{SL}^2 + V_{S3\text{заг.вращ.}}^2}},$$

Теперь можно определить η .

$$\mu = ai \pm \alpha_{SL} - \eta$$

4.8 Угол подачи при дискретном задании движения подачи врезания и наличия движения кругового профилирования

При круговом профилировании заготовке или инструменту придают дополнительное вращение.

При дискретном задании дополнительного вращения заготовке смещается положение оси симметрии ветви циклоиды. При отключении круговой подачи происходит движение формообразующей точки по траектории имеющей форму как и прежде, но развернутую на угол соответствующий выполненному перемещению.

В случае, когда движение кругового профилирования $D_{кр.пр.}$ осуществляется на заготовке—движение кругового профилирования рассматривается как движение подачи. Это движение характеризуется вектором скорости движения подачи $V_{Скр.проф}$. Вектор $V_{Скр.проф}$ направлен нормально к оси OO_1 . Проходит через точку O_1 . (он является дополнительным вращением заготовки). Уравнение траектории точки режущей кромки при выполнении непрерывного движения кругового профилирования на заготовке будет:

$$\begin{cases} x = L \cos \left(\alpha + \frac{\alpha}{2\pi} S_{кр/з} \right) - R \cos(\alpha(i-1)) \\ y = L \sin \left(\alpha + \frac{\alpha}{2\pi} S_{кр/з} \right) + R \sin(\alpha(i-1)) \end{cases}$$

т.е.

$$\begin{cases} x = L \cos \left(\alpha \left(1 \pm \frac{S_{кр/з}}{2\pi} \right) \right) - R \cos(\alpha(i-1)) \\ y = L \sin \left(\alpha \left(1 \pm \frac{S_{кр/з}}{2\pi} \right) \right) + R \sin(\alpha(i-1)) \end{cases}$$

$$V_{сз}^2 = V_{сзаг.вращ.}^2 \pm V_{Скр.проф}^2$$

Знак + берется в случае если направление вращения заготовки и движения круговой подачи совпадают по направлению, знак – при противоположных направлениях вращения.

$V_{сзаг.вращ.}$ - Скорость движения подачи заготовки в движении вращения (вращение заготовки).

$$\cos(\eta) = \frac{V + V_S \cos(\alpha i \pm \alpha S_L)}{V_e} = \frac{V + \sqrt{V_{сзаг.вращ.}^2 \pm V_{Скр.проф}^2} \cos(\alpha i)}{\sqrt{V^2 + V_{сзаг.вращ.}^2 \pm V_{Скр.проф}^2}};$$

Угол скорости резания будет:

$$\eta = \arccos \left(\frac{V + \sqrt{V_{сзаг.вращ.}^2 \pm V_{Скр.проф}^2} \cos(\alpha i)}{\sqrt{V^2 + V_{сзаг.вращ.}^2 \pm V_{Скр.проф}^2}} \right).$$

Угол подачи будет определяться по формуле:

$$\mu = \alpha i - \eta$$

Общая схема определения угла подачи при профилировании путем непрерывного изменения параметра L , непрерывного движения круговой подачи и непрерывного движения врезания

Зависимость угла скорости резания имеет вид:

$$\cos(\eta') = \cos(\eta) \cos \left(\arctg \left(\frac{V_{\text{свр}}}{\sqrt{V^2 + V_{\text{сз}}^2 + V_{\text{свр}}^2}} \right) \right)$$

$$\cos(\eta') = \frac{V + \sqrt{\pm V_{\text{SL}}^2 + V_{\text{сзг.вращ.}}^2 \pm V_{\text{скр.проф}}^2} \cos \left(\alpha_i \pm \arctg \left(\frac{V_{\text{SL}}}{V_{\text{сзг.вращ.}}} \right) \right)}{\sqrt{V^2 + V_{\text{SL}}^2 + V_{\text{сзг.вращ.}}^2 \pm V_{\text{скр.проф}}^2}}$$

5 СПОСОБЫ ПЕРЕРАБОТКИ И УТИЛИЗАЦИИ НЕФТЕСОДЕРЖАЩИХ ОТХОДОВ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

5.1 Постановка задачи

В результате производственной деятельности предприятия образуются опасные для рабочих и окружающей среды отходы. По данным Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды в Республике Беларусь в 2018 году образовалось 60 723 тыс. тонн отходов. Использовано, передано за год лишь 20 106 тыс. тонн [93]. Таким образом, масса отходов производств в Республике Беларусь за год увеличилась и превысила 1,2 млрд тонн. При таком темпе прироста (3–4% в год) отходов на предприятиях республики через 25–30 лет будет находиться более двух млрд тонн отходов, которые даже при соблюдении всех существующих правил и норм хранения и захоронения представляют огромную потенциальную опасность как для работников этих предприятий, так и для окружающей среды в целом.

Среди таких отходов особое место занимают нефтесодержащие, которые, с одной стороны, представляют угрозу для здоровья и жизни работников предприятий, населения и окружающей среды, а с другой – могут служить источником вторичных материальных ресурсов. По данным [94], загрязнение вод нефтепродуктами (НП) составляет более 30% общего техногенного загрязнения. Данные отходы подлежат обязательному сбору и утилизации, а в отдельных случаях – уничтожению [93-97].

В Республике Беларусь темпы прироста количества отработанных растворов, а также отходов эмульсий и смесей НП превышают от 3 до 10 раз темпы прироста отходов в среднем по республике в целом [98], что требует принятия и проведения мер, направленных на улучшение ситуации.

Накопление этих отходов во многом объясняется теми требованиями, которые предъявляются к отработанным нефтепродуктам, предназначенным для регенерации, очистки и использованию взамен или наряду с другими нефтепродуктами. Так, согласно ГОСТ 21046 смеси отработанных нефтепродуктов, предназначенные для использования в качестве компонента котельного топлива, должны иметь массовую долю механических примесей не более 1%, массовую долю воды не более 2%, кроме того в них должны отсутствовать загрязнения. Для выполнения требований ГОСТа необходимо наличие на предприятии дорогостоящего специализированного оборудования. Это в свою очередь, в сочетании с большими расходами на транспортировку к местам централизованной приемки для большинства предприятий делает сбор, регенерацию и утилизацию экономически нецелесообразными. Этот факт подталкивает многие предприятия к

нелегальному сбросу отработанных растворов ТМС в СВ, что несет колоссальную потенциальную угрозу окружающей среде.

Для машиностроительных предприятий является перспективным поиск способов применения нефтесодержащих отходов (НСО) непосредственно на предприятии или на предприятиях данного региона, причем желательно с минимальными затратами на очистку и переработку, путем использования их для приготовления товарных продуктов, не требующих высокой степени очистки сырья от механических примесей и для которых наличие воды в них является скорее преимуществом, чем недостатком.

5.2 Влияние нефтесодержащих отходов машиностроительного предприятия на здоровье работающих и окружающую среду

Отечественные и зарубежные исследования показали, что углеводороды нефтяного происхождения и их производные оказывают негативное влияние на здоровье человека [99,100]. Наблюдается рост общей заболеваемости, увеличение числа болезней органов дыхания, нервной системы и органов чувств, сердечно-сосудистой системы и желудочно-кишечного тракта [100,101]. Для большинства рабочих машиностроительного производства характерны перенос тяжестей вручную и напряженность трудового процесса, что ускоряет дыхание и кровообращение, способствуя тем самым поступлению вредных веществ в организм [102,103].

Влияние НСО и отработанных растворов технических моющих средств (ТМС) не ограничивается ролью источника профессионального или производственно-обусловленного заболевания. Лица, которые постоянно контактируют с данными веществами, чаще болеют общими заболеваниями (острыми респираторными заболеваниями, гриппом, воспалением верхних дыхательных путей и легких, расстройством органов пищеварения), а процесс выздоровления идет медленнее. При проведении медосмотров они жалуются на усталость, раздражительность, бессонницу, волнение, отсутствие аппетита, боли в суставах и мышцах [99,104].

Отработанные масла, которые являются основной составляющей НСО, содержат базовый смазочный материал, присадки, продукты разложения базовых компонентов и срабатываемости присадок, продукты изнашивания, а также могут содержать посторонние примеси. Состав отработанных масел (ОМ) определяет не только способы их утилизации, но и степень воздействия на человека и окружающую среду [105]. Изменение химического состава работающих смазочных материалов происходит под влиянием температуры и давления среды, кислорода воздуха, воды, каталитического действия металлов, солнечного и искусственного света, посторонних примесей, микроорганизмов, что также ведет к росту экологической опасности [106,107].

Во время эксплуатации смазочных материалов (СМ) происходит разложение отдельных их компонентов, кроме того в СМ попадают различные загрязнения. Это приводит к росту токсичности и канцерогенности [102,103]. На участке машиностроительного предприятия к основным токсичным загрязнениям можно отнести:

- продукты старения СМ, в том числе образовавшиеся при термическом разложении, окислении и нитрировании;
- вещества, возникшие при неполном сгорании топлива;

- различного рода растворители;
- бактерии;
- грибки.

Следует отметить, что токсичные вещества могут образовываться при нарушении правил транспортировки и хранения СМ, а также совместного сбора отработанных смазочных материалов (ОСМ). Во всех случаях опасность для человека заключается в попадании вредных материалов на кожу и при вдыхании их паров. При этом возможно появление дерматитов и аллергических заболеваний, способствующих возникновению трещин на коже рабочего и попаданию инфекции в организм человека. Это происходит при низкой культуре производства (особенно при отсутствии или неиспользовании средств защиты) и нарушении правил гигиены.

На рисунке 5.2.1 представлены канцерогенные соединения в ОСМ, которые отсутствуют в свежих товарных продуктах. Эти вещества, а также соединения галогенов значительно затрудняют переработку и утилизацию ОСМ.

Наиболее значимые результаты достигнуты в исследовании канцерогенной активности отработанных смазочно-охлаждающих технологических средств (СОТС) и моторных масел [108,109].

Исследования, проведенные в Евросоюзе [110], показали, что в ряде отработанных СМ, по сравнению со свежими маслами, возрастает канцерогенная активность. Это объясняется биологической активностью полициклических аренов (ПАУ), которые являются продуктами термического разложения масел и неполного сгорания топлива.

Канцерогенность отработанных растворов ТМС меньше из-за небольшого процентного содержания в своем составе ОМ, хотя и в них отмечено некоторое увеличение концентрации ПАУ [111]. В большинстве городов Беларуси системы канализации включают совместную биологическую очистку производственных и коммунальных сточных вод (СВ) [112]. При попадании в них поверхностно-активных веществ (ПАВ), содержащихся в отработанных растворах ТМС, на поверхности водоемов образуется устойчивая пена, препятствующая аэрации, что снижает качество очистки. Кроме того, ПАВ способствуют разрыву звеньев установившихся пищевых цепей – гибель планктона и водорослей влияет на другие живые организмы.

Поверхностно-активные вещества, содержащиеся в отработанных растворах ТМС, могут попадать в подземные воды, загрязняя их, что уменьшает объем пресной воды, которую можно использовать без предварительной очистки [112].

В ОМ может содержаться полихлордифенил (ПХД), который характеризуется плохой биологической разлагаемостью (способен накапливаться в организмах человека и

животных, в основном в жировых тканях) [112]. Следует отметить, что производство и применение ПХД сравнительно невелико, в ряде стран они запрещены.

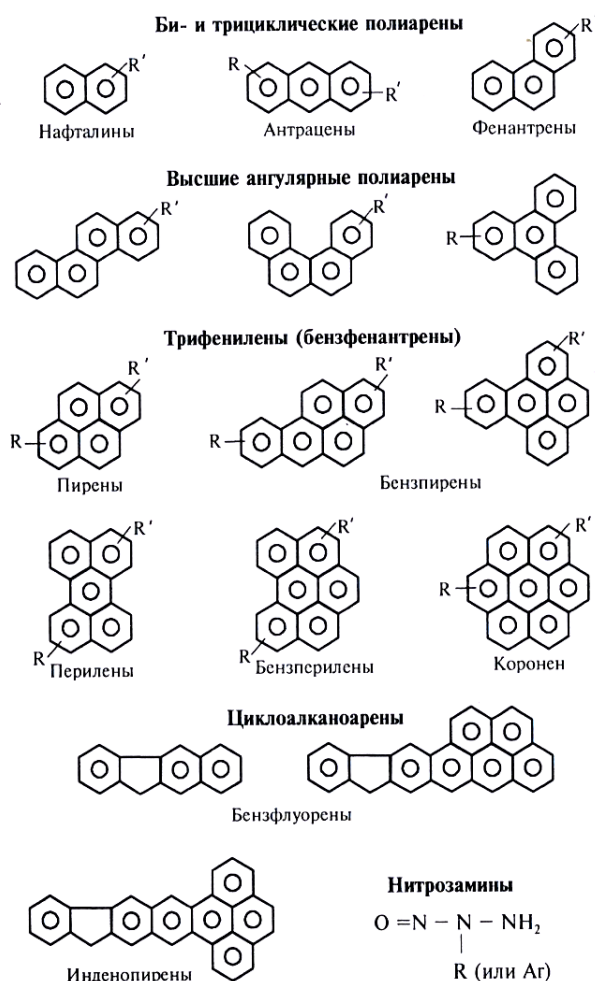


Рисунок 5.2.1. – Канцерогенные соединения в смазочных материалах [109]

Изложенное выше говорит о факторах, которые могут повлиять на эффективность переработки ОСМ и других НСО. При этом надо учитывать, что уровень научных знаний о старении синтетических масел не позволяет в полной мере оценить их экологическую угрозу.

Отработанные смазочные материалы представляют собой сложные многокомпонентные продукты. Их составом определяются степень воздействия на биосферу и способы утилизации отходов. При оценке экологических свойств ОСМ чрезвычайно важна оценка срока службы первичного материала. Загрязнение окружающей среды, переработка и рациональное использование ОСМ существенно зависят от этого показателя. Экономически выгодно увеличить срок службы СМ, но при этом, как правило, возрастает накопление экологоопасных продуктов в ОСМ, что приводит к

усложнению и удорожанию процессов утилизации этих материалов [111]. Достаточно объективных и однозначных критериев срабатываемости смазочных материалов нет [113]. Это затрудняет определение срока службы СМ, с учетом изменения их экологической опасности и выбора рационального способа утилизации [109]. Вероятно, следует сократить срок службы СМ и ограничить его экологически оптимальной продолжительностью. Последнее, кроме меньшей степени канцерогенности ОСМ, облегчает его последующую утилизацию.

Экологические свойства смазочных материалов позволяют сделать вывод об их экотоксичности и нежелательности попадания в окружающую среду [111]. Часто СМ попадают в водоемы и почву из-за проливов и утечек материалов через уплотнительные элементы машин и механизмов.

На загрязнение окружающей среды влияет испаряемость НСО, которая зависит от химического и фракционного составов НСО и температуры их хранения. Наличие в НСО топливных фракций и увеличение их температуры способствуют росту испарения веществ, оказывающих негативное влияние на человека и окружающую среду.

Установлено [111], что опасными и непредсказуемыми являются последствия биоаккумуляции вредных соединений ОСМ и последующего попаданием их в пищевые цепи. Это расширяет в пространстве и отдаляет во времени последствия воздействия ОСМ на окружающую среду и человека.

Оценка последствий загрязнения НСО экологических систем с учетом взаимодействия и взаимовлияния экологических факторов (антропогенного, биотического и абиотического) [114] свидетельствует: первый из них учитывает многокомпонентность НСО, оказывающих вредное влияние на человека и окружающую среду; второй – гетерогенность структуры и состава самой экологической системы, подвергшейся загрязнению; третий – множество постоянно изменяющихся факторов, воздействующих на экологическую систему (влажность, температура и др.).

Таким образом, изложенное выше говорит об актуальности исследований по разработке методов и способов утилизации НСО с целью снижения, а в идеале – исключения вредного влияния их на здоровье работающих и окружающую среду.

5.3 Анализ источников нефтесодержащих отходов и нормативных документов в сфере обращения с отходами производства

Государство через систему лимитов отходов, налогов и штрафов оказывает воздействие на предприятия с целью снижения объемов отходов производства [115]. Министерство природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь ежегодно уменьшает установленный лимит отходов, выбрасываемых в окружающую среду, за который предприятие платит экологический налог.

В зависимости от агрегатного состояния отходы делятся на газообразные, жидкие и твердые. Наибольшую опасность и трудность в переработке представляют отходы первых двух видов.

Газообразные вещества и взвеси, выбрасываемые предприятиями в атмосферу, состоят более чем из 40 наименований, химический состав которых зависит как от вида исходных материалов, так и технологических процессов их переработки. В атмосферу выбрасывают пыль, дым, сажу, копоть, аэрозоли масляные и поверхностно-активные вещества (ПАВ), альдегиды, ароматические растворители, хромовый и серный ангидриды, хлориды водорода, оксиды углерода, азота, серы и др. [99]. Запыленный воздух состоит из взвеси несмешивающихся друг с другом твердой дисперсной и газовой фаз [116]. Технологические процессы производства дают около 13% общей массы газообразных выбросов и аэрозолей, остальные выбросы обусловлены сжиганием топлива [117].

В производстве, например, связанном с ремонтом оборудования и машин, в течение года образуется до 20 тыс. тонн нефтесодержащих СВ в виде отходов производственных участков, таких как разборка и очистка технологического оборудования, обработка резанием заготовок, обкаточно-испытательный и др.. В жидких стоках содержатся моторные и трансмиссионные масла, пластичные смазки, топливные фракции, ТМС, СОТС, промывочные жидкости и др.

Наибольшее количество жидких НСО выделяют участки по разборке и очистке технологического оборудования предприятий [118]. Эти отходы, образуются в процессе эксплуатации машин и оборудования, являются сложными многокомпонентными системами и включают (% об.) [119]: масла моторные 65...90, масла трансмиссионные 6...10; топливные фракции 2...6 и пластичные смазки 1...2.

Промышленные СВ по своему составу и свойствам значительно отличаются от исходного состояния, отражая разнообразие технологических процессов, в которых эти воды принимали участие. В частности, содержание нефтяных фракций и взвешенных веществ в СВ достигает 1100 мг/л [118]. Растворимость минеральных масел в воде

ничтожна, но в СВ устойчивые масляные эмульсии образуются за счет их высокой дисперсности и наличия эмульгаторов [119,120].

С целью улучшения ситуации в Республике Беларусь принят ряд документов, регламентирующих обращение с НСО. Так, действует Технический регламент Таможенного союза «О требованиях к смазочным материалам, маслам и специальным жидкостям», в котором указано, что основными опасными факторами (рисками), возникающими при производстве, выпуске, использовании (эксплуатации) и переработке (утилизации) продукции, являются:

- пожаровзрывоопасность;
- экологическое воздействие отработанных материалов при попадании их в окружающую среду;
- вредное воздействие отходов на организм человека.

С 1 августа 2012 года действует Указ Президента Республики Беларусь № 313 «О некоторых вопросах обращения с отходами потребления», который направлен на уменьшение объемов отходов, хранящихся на предприятиях, исключение их вредного воздействия на человека и окружающую среду, рост уровня вовлечения вторичных ресурсов в хозяйственный оборот.

Согласно Налоговому кодексу Республики Беларусь (Особенная часть) от 29 декабря 2009 г. № 71-3 (с учетом изменений и дополнений, включая Закон Республики Беларусь от 9 января 2017 г. № 15-3) [121] ставки экологического налога (BYN) за захоронение 1 тонны составляют: неопасных отходов производства – 4,53; опасных отходов производства: третьего класса опасности – 115,11; четвертого класса опасности – 57,39. Ставки экологического налога (BYN) за хранение 1 тонны: неопасных отходов производства – 0,99; опасных отходов производства: второго класса опасности – 29,47; третьего класса опасности (включая НСО) – 9,80; четвертого класса опасности (включая НСО) – 4,90.

Доля *отработанных нефтяных масел* в отходах среди смазочных материалов наибольшая. При этом загрязнение водного бассейна только отработанными нефтяными маслами составляет 20% общего техногенного загрязнения, или 2/3 от загрязнения НП [122]. Производство нефтяных масел продолжает расти, что способствует увеличению объема ОМ. В большинстве стран мира растет сбор, регенерация и переработка ОМ [122]. Объемы сбора отработанных смазочных материалов различных видов сильно отличаются: для трансформаторных масел они могут достигать 90%, а для моторных в лучшем случае – 40%.

Моторные масла составляют значительный объем ОМ и содержат наряду с парафиновыми, нафтеновыми и ароматическими углеводородами и присадками, продукты изнашивания и старения [123].

Как отмечают А. Ю. Евдокимов и И. Г. Фукс [97], подавляющее количество мирового сбора ОМ (70...90%) используют в качестве топлива. В Евросоюзе менее 50% собираемых ОМ поступает на регенерацию и переработку, а остальной их объем используют как топливо или уничтожают. Однако в свете ужесточения европейских законодательств и при росте спроса на экологобезопасные смазочные материалы это количество должно значительно возрасти в ближайшем будущем.

Как отмечалось выше, во введении, в Республике Беларусь предприятиями собирается ОМ менее 10% от потребления свежих продуктов. Одна из причин потери НП – неэффективное использование ОМ. В настоящее время этот вид отходов не вовлечен в экономику страны, а преимущественно сжигается (не всегда с извлечением тепловой энергии) или нелегально сбрасывается в СВ, что негативно влияет на здоровье людей и окружающую среду.

При сборе для вторичной переработки НСО важно, чтобы отработанные синтетические масла не попадали в смеси с минеральными маслами, так как они могут негативно влиять на эффективность используемых процессов регенерации и утилизации. Для этого необходима организация отдельного сбора, а также повышение культуры использования товарных масел и сбора отработанных. Следует отметить трудности, возникающие при регенерации отработанных полусинтетических масел [122]. Из-за этого в ряде стран Евросоюза, в частности в Германии [3122], введены ограничения на содержание полиалкиленгликолей в НСО для переработки. Однако примеси синтетических масел в НСО вспомогательного производства, как правило, незначительны.

Пластичные смазки. В отличие от крупного потребителя пластичных смазок (железной дороги), где объем сбора отработанных пластичных смазок (ОПС) достигает 80% от потребления свежих [118], в машиностроительном производстве сбор ОПС ведется периодически. Это объясняется организационными сложностями сбора при малом объеме потребления, незначительными количествами ОПС в узлах трения и сложностью удаления смазки из них. Между тем организация сбора и разработка эффективных технологий утилизации небольших объемов ОПС позволит улучшить состояние окружающей среды, а также снизить импорт нефтесодержащих продуктов.

Растворы технических моющих средств. По данным Н. Ф. Тельнова [124], предприятия по ремонту машин и оборудования применяют более 100 наименований различных ТМС, из которых наиболее широкое распространение получили ТМС серий

Лабомид (Лабомид-101, Лабомид-102, Лабомид-203), разработанные в ГОСНИТИ (Москва), и МС (МС-6, МС-8, МС-15, МС-32), разработанные в МИИСП им. В. П. Горячкина (Москва).

В производстве, как правило, для очистки от остатков масел и смазок, асфальто-смолистых загрязнений используют струйные и погружные машины. Внедрение новых высокоэффективных ТМС способствует тому, что погружные машины постепенно вытесняют струйные [125]. Это объясняется высоким пенообразованием в последних, а также тем, что высокая кратность перекачивания моющего раствора (до 20 ч^{-1}) приводит к образованию стабильных эмульсий частиц загрязнения в растворе, в результате чего раствор быстро загрязняется. Большая часть молекул ПАВ при этом адсорбируется на уже очищенных частицах загрязнения и в процессе дальнейшей очистки не участвует. Такие эмульсии практически не поддаются расслоению и регенерации, а их слив в канализацию наносит урон окружающей среде.

В производстве на участках по разборке и очистке технологического оборудования с небольшими программами ремонта, как правило, используют погружные моечные машины, реализующие способ интенсификации процесса очистки возвратно-поступательными колебаниями очищаемых поверхностей в моющем растворе. Кроме данного типа, используют моечные машины с маятниковыми колебаниями очищаемых объектов, роторные моечные машины, моечные машины с лопастными винтами, моечные машины с роторами-активаторами и другие.

По данным Л. М. Гурвича [126], срок службы растворов ТМС составляет 1...4 недели. Исходя из этого, был рассчитан предполагаемый средний годовой объем отработанных растворов ТМС для различных типов моечных машин (таблица 5.3.1), который на одну моечную машину составляет от $2,25 \text{ м}^3$ (ОМ-9101) до $1320,00 \text{ м}^3$ (ОМ-14286). Наименьшее потребление раствора при очистке 1 тонны деталей составляет $0,0045 \text{ м}^3/\text{т}$ (ОМ-14251) и $0,0050 \text{ м}^3/\text{т}$ (ОМ-22602), наибольшее – $0,0185 \text{ м}^3/\text{т}$ (ОМ-14286). Однако эти значения не позволяют определить, какая из машин наиболее эффективна, так как каждая из них предназначена для очистки деталей определенной номенклатуры, но позволяют дать ориентировочную оценку объема растворов ТМС, необходимого предприятию. Например, для очистки деталей общей массой 10 тыс. тонн необходим объем раствора 115 м^3 .

Полностью отработанные растворы ТМС подлежат обезвреживанию и утилизации. В Евросоюзе это и экологическое мероприятие, и источник прибыли, так как продукты, получаемые при переработке этих НСО, являются товарными. Установлено [127], что

моющие растворы ТМС способны накапливать в своем составе до 43 г/л масел. Это около 5 тонн масел для производства с массой очищаемых деталей 10 тыс. тонн.

Таблица 5.3.1. – Средний годовой объем отработанных растворов ТМС, образующихся в моечных машинах на участках по разборке и очистке технологического оборудования

Марка машины	Производительность очистки, т/ч	Объем однократной заправки раствора ТМС, м ³	Средний объем раствора, необходимый для очистки одной тонны деталей, м ³ /т	Средний годовой объем отработанных растворов ТМС, м ³ /год
<i>Моечные машины с возвратно-поступательными колебаниями грузовой платформы</i>				
ОМ-9101	0,02	0,07	0,0125	2,25
ОМ-12190	0,1	0,5	0,0340	16,25
Мирин	0,2	0,5	0,0095	16,25
Мингус АЖ-ЛИФ	0,6	1,2	0,0075	39,00
ОМ-22609	1,5	3,0	0,0075	97,50
ОМ-22602	4,0	6,0	0,0050	195,00
<i>Моечные машины с маятниковыми колебаниями очищаемых объектов</i>				
ОМ-21630	3,0	5,0	0,0025	165,00
ОМ-21629	5,0	10,0	0,0075	330,00
ОМ-21628	8,0	20,0	0,0095	660,00
<i>Моечные машины с лопастными винтами</i>				
ОМ-281.01	1,5	3,6	0,0090	117,00
ОМ-14251	4,0	4,6	0,0045	149,50
ОМ-5333	12,0	22,0	0,0070	665,00
<i>Моечные машины с роторами-активаторами</i>				
ОМ-14295	2,7	7,0	0,0095	227,50
ОМ-14286	8,0	40,0	0,0185	1320,00

Отработанные растворы ТМС содержат в своем составе наряду с НП значительное количество щелочных добавок и различных ПАВ, которые практически невозможно выделить из раствора и утилизировать [125]. Все известные технологии разделения этих растворов на отдельные компоненты требуют не только больших капитальных вложений, но и значительных текущих расходов, что для большинства средних и малых предприятий является труднодостижимым. Это может подтолкнуть некоторые из них к нелегальному сбросу отработанных растворов ТМС в СВ, что потенциально несет угрозу окружающей среде.

Таким образом, можно сделать вывод о необходимости проведения исследований по поиску способов переработки и использования отработанных растворов ТМС без их разделения на компоненты.

5.4 Регенерация загрязненных нефтесодержащих продуктов как способ снижения объемов нефтесодержащих отходов, подлежащих утилизации

Использование технических решений, уменьшающих объем НСО, подлежащих утилизации, улучшает состояние окружающей среды. Наиболее эффективным способом уменьшения объема НСО, подлежащих утилизации, является регенерация – переработка отработанных нефтесодержащих продуктов с целью восстановления их первоначальных свойств. Регенерация позволяет за счет уменьшения объема НСО снизить риски загрязнения окружающей среды.

Регенерацию осуществляют при очистке начавших терять свои эксплуатационные свойства загрязненных НП, которые, как правило, предварительно сливают из технологического оборудования. Регенерация НП осуществляется с использованием сложных технологических процессов, основанных на физических и химических методах, и требует больших капитальных вложений.

Нефтяные масла. Лишь небольшая часть (как правило, смеси различных отработанных нефтяных масел, собираемых централизованно на промышленных предприятиях), подвергается переработке для возврата в производство свежих продуктов [94-96].

Следует отметить серьезный недостаток существующих технологий очистки масел – низкая производительность процесса [95,97].

Среди применяемых в промышленности процессов следует отметить технологию PROP [95] (компания Phillips Petroleum, США), схема которой представлена на рисунке 5.4.1. Преимуществом ее является возможность получения товарных моторных масел без добавления свежих продуктов. Большинство действующих промышленных установок не имеют стадии перегонки, что вместе с отсутствием контроля предела выкипания конечного продукта является недостатком этого процесса. Современные промышленные установки основаны на комбинировании с секцией фракционирования масла. Процесс требует значительных капитальных и текущих затрат. Установка выходит на положительную рентабельность при объеме переработки более 30 000 м³/год. Однако даже самые крупные предприятия Беларуси не в состоянии обеспечить такой объем, а большие транспортные расходы в сочетании со сложностью организации эффективного процесса сбора и доставки масел, подлежащих регенерации, делают нецелесообразной возможность использования процесса для всей страны.

Растворы ТМС. Для отработанных растворов ТМС технологические машины, реализующие способы отстаивания, коагуляции и флотации, применяют при создании

индивидуальных и централизованных пунктов регенерации этих растворов. Длительное использование растворов предполагает периодическое удаление загрязнений и добавку свежего продукта. Очистка и восстановление первоначальных свойств работающих растворов ТМС на месте потребления позволяет снизить их расход примерно на 40%, устранить коррозию оборудования, неприятные запахи и на 94% снизить возникновение дерматитов у обслуживающего персонала [117].



Рисунок 5.4.1. – Схема процесса PROP

Пластичные смазки. Установлено, что в настоящее время отсутствуют технологии регенерации отработанных пластичных смазок (ОПС), которые можно эффективно использовать в условиях производства [97,117].

Синтетические масла. В Евросоюзе в основном синтетические масла регенерируются с применением сернокислотной очистки, что приводит к постоянному росту объемов кислого гудрона [95].

Использование отработанных синтетических масел в качестве топлива имеет особенности [94,96]. Это связано с тем, что если в нем присутствуют полиальфаолефины, то в смеси с нефтяными маслами они образуют двухфазную систему. В результате возникают сложности с перекачкой топлива, а главное – может нарушаться впрыск топлива и, как следствие, стабильность горения.

По окончании срока службы смазочных материалов природоохранный аспект должен превалировать над экономическим, учитывающим исключительно выгоду и техническую целесообразность повторного использования нефтесодержащего продукта. Поэтому бесконечная регенерация невозможна. Наступает стадия утилизации НСО и отработанных растворов ТМС.

5.5 Направления использования, совершенствования переработки и утилизации нефтесодержащих отходов предприятий

Экологически безопасное использование отработанных НСО предполагает их переработку с получением товарных продуктов самого различного назначения. По сути, эти отходы представляют собой ценное вторичное сырье, которое целесообразно использовать повторно [118].

Смазочные материалы. Смеси отработанных масел, централизованно собираемые в различных отраслях промышленности, содержат ценные компоненты, необходимые для получения масел узкоспецифического назначения (маловязких типа И-8А и И-12А), извлечь которые, как правило, не удастся при использовании традиционных способов очистки. Для этой цели предложен способ термодиффузионного разделения масел группы МИО [95], основанный на образовании градиента концентраций в многокомпонентных смесях вследствие наличия температурного градиента в термодиффузионных колонках аппарата АТР-3.

В странах СНГ проводятся исследования по вовлечению в производство пластичных смазок продуктов вторичной переработки масел [94,97]. В качестве омыляющих агентов используют оксиды, гидроксиды или карбонаты натрия, лития, бария, алюминия.

Нефтесодержащие отходы производства могут служить сырьем для таких предприятий, которые расположены в близлежащих регионах.

Конструкционные материалы. Предложены способы отверждения отработанных масел. Получаемые продукты могут быть использованы для получения наполнителей и изоляционных материалов. Известны отвердители на основе ОМ.

Консервационные составы. Благодаря своим защитным свойствам масел могут быть использованы для производства консервационных составов без применения защитных присадок [94-96]. Известны случаи использования для консервации машин и агрегатов отработанных трансмиссионных масел после очистки их от механических загрязнений и воды. При этом необходимо проводить исследования с целью исключения коррозии оборудования. В случае необходимости требуется добавлять ингибиторы коррозии, в частности АКОР-1.

Покрyтия. Нанесение покрытий на рабочие поверхности форм для получения сборного железобетона является обязательной технологической операцией. Для этой цели расходуют большое количество смазочного материала, выбор которого играет важную

роль в совершенствовании производства железобетонных изделий (ЖБИ). К материалам покрытий предъявляют следующие требования:

- повышенная адгезия к металлу и пониженная – к бетону;
- возможность механизации и автоматизации процессов приготовления и нанесения покрытий на поверхность форм;
- отсутствие потребности в очистке поверхности форм от остатка бетона;
- исключение возможности появления пятен и воздушных пор на поверхности изделий, прилегающих к форме;
- недопущение снижения прочности и плотности бетона в поверхностных слоях;
- придание противокоррозионных и защитных свойств;
- отсутствие веществ, вредных для здоровья рабочих;
- безопасность в пожарном отношении;
- компоненты материала не должны быть дорогостоящими и дефицитными.

В качестве материала покрытий применяют различные масла и растворы НП, отходы химической и мыловаренной промышленности и др. В производстве ЖБИ используют товарные: машинное, веретенное, трансформаторное и другие [94]. Однако в связи с малой вязкостью они легко стекают с бортов формы, а также образуют масляные пятна на готовой продукции. Использование чистых масел повышает стоимость покрытий. Некоторые материалы, имеющие в своем составе керосин или дизельное топливо [117], являются пожароопасными и создают антисанитарные условия в цехах, негативно влияют на организм человека, одежду и обувь.

Установлено, что известные эмульсии типа «масло в воде» на основе отработанных масел для покрытия форм отличаются низкой стабильностью (из эмульсии выделяется масло) [94], а значит на поверхностях готовых ЖБИ могут оставаться темные пятна. Кроме того, приготовленную эмульсию необходимо непосредственно перед применением перемешать [94], что усложняет технологический процесс изготовления ЖБИ.

В ряде случаев в качестве покрытий форм используют суспензии на основе глины, талька, графита, шлака, золы и других веществ. Эти покрытия предотвращают сцепление бетона с металлом форм, создавая между ними после испарения воды слой порошка – компонента суспензии. Однако глиняные и другие водные суспензии при укладке бетона легко повреждаются, и на форме остаются незащищенные покрытием места.

Использование раствора мыла в виде отходов мыловаренной промышленности наряду с достоинством (легкая разборка форм, гладкая и чистая поверхность изделия) [94] имеет и недостатки (быстрое зарастание формы бетоном, коррозия форм), так как в составе покрытия имеется поваренная соль. Следует отметить и сложность технологий

приготовления данных покрытий: нагрев масел до 70...90 °С, кубового остатка производства мыла – до 60...65 °С, высокую вязкость, затрудняющую нанесение покрытия тонким слоем на поверхность форм для изготовления ЖБИ.

Известны случаи использования в составе антиадгезионного покрытия рапсового масла, метиловых эфиров жирных кислот рапсового масла, жирных кислот растительных масел [96]. Однако данные о промышленном использовании этих материалов не обнаружены.

Попытки использовать в качестве покрытий кремнийорганические соединения показали, что формы разбираются без затруднений и имеют хорошую чистую поверхность, однако покрытия получаются нестабильными и не нашли широкого применения.

Основным компонентом товарных материалов, используемых при изготовлении ЖБИ, являются масла. При этом обращает на себя внимание высокая цена данных материалов (таблица 5.5.1).

Таблица 5.5.1. – Цена товарных антиадгезионных материалов [36, 37]

Наименование материала	Цена за 1 кг, BYN
Сепарен специаль	4,83
Смазка разделительная универсальная V40 SAWD 15	1,49
Смазка для форм и опалубки Normusend HLV-37 fast and strong	40,00
Смазка для опалубки Бетанол-С	2,61
Смазка для опалубки и форм ЖБ Масло 1-3	1,25
Смазка для опалубки Масло 1-8	1,25
Смазка для форм силиконовая	8,00 за 1 литр
Универсальный разделяющий спрей (смазка)	9,00 за 1 литр
Эмульсол Петрамин	2,51
Эмульсол РВ	1,44
Эмульсол Р	1,50
Эмульсол универсал	1,61
Эмульсол ЭГТ	1,67
АТ-5-Б	1,48

Для приготовления эмульсий и эмульсолов, используемых в качестве антиадгезионного покрытия форм, используют электрические мешалки (длительность процесса приготовления 5...8 часов) [94], ультразвуковое смешивание (например, в ванной с погруженным пьезокерамическим преобразователем с рабочей частотой обработки 22 кГц) [96].

Анализ литературных источников показал, что препятствиями на пути проведения исследований по разработке технологии утилизации НСО и отработанных растворов ТМС, позволяющей получить антиадгезионное покрытие для смазки форм при производстве ЖБИ, не уступающее по эффективности товарным смазкам и имеющее значительно более низкую себестоимость, являются отсутствие следующих факторов производства:

- технологий с низкой трудоемкостью процесса приготовления эмульсии;
- описания механизма эмульгирования двух несмешивающихся жидкостей путем разрушения поверхности их раздела ударными волнами, генерируемыми ПИ, определяющего условия образования эмульсии из НСО;
- разработанного состава эмульсии на основе НСО;
- исследований о влиянии состава эмульсии на ее стабильность;
- информации о способах устранения следующего недостатка – возможного появления темных жирных пятен на поверхности железобетонных изделий при наличии в составе покрытия (на основе НСО) мазута или дизельного топлива.

Топливо. Наибольший объем ОСМ используется в качестве топлива и в его производстве в смеси с другими нефтяными топливами [94]. Энергетические характеристики ЗНП близки к характеристикам котельно-печного топлива [94]. Применение ОСМ в качестве высококачественного топлива возможно в результате переработки этих отходов по сложным технологиям [95], в частности таким как процесс Sec-Feed (рисунок 5.5.1).

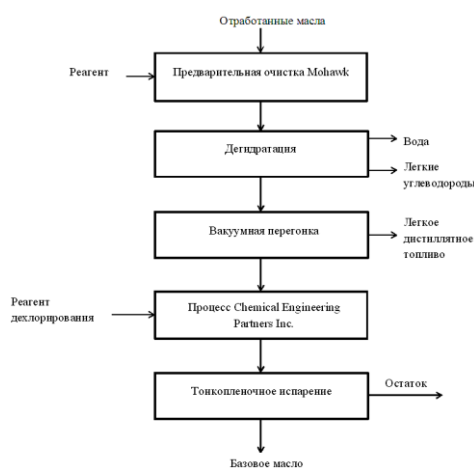


Рисунок 5.5.1. – Схема процесса Sec-Feed

Из отработанных масел можно получать и газообразное топливо путем газификации в псевдосжиженном слое теплоносителя (например, до 35% угольной пыли при температуре 945 °С) [96].

Все указанные выше способы использования НСО в качестве топлива требуют больших капитальных вложений и объемов НСО, что в сочетании с наличием воды в НСО, которую необходимо удалить, делает использование этих способов экономически нецелесообразным для малых и средних предприятий. Однако возможность использования отработанных НСО как источника энергии вызывает интерес с практической точки зрения при выполнении требований ТКП по охране окружающей среды и природопользованию.

5.6 Выбросы котельных установок и способы их снижения

В настоящее время проблема защиты окружающей среды от вредных выбросов, образующихся при использовании ископаемого топлива, в том числе и природного газа, привлекает внимание не только ученых, но и всей мировой общественности [94,95]. В последние годы, отмечает М. А. Стырикович [130], особую опасность приобрело антропогенное воздействие на атмосферу котельных установок, количество которых увеличивается с каждым годом. Ежегодные выбросы основных токсичных веществ составляют (млн тонн): сернистого ангидрида – 150; оксида углерода – 300, оксидов азота – 50 [130].

На основании данных И. Я. Сигала [131] в таблице 5.6.1 приведены результаты воздействия некоторых токсичных веществ на организм человека, подтверждающие актуальность проведения работ по снижению вредностей в продуктах сгорания топлива.

Таблица 5.6.1. – Характеристика воздействия вредных веществ на человека

Длительность и характер воздействия на человека	Содержание в воздухе, %		
	CO	NO _x	SO ₂
Несколько часов без заметного действия	0,01	0,0008	0,0025
Признаки легкого отравления	0,01...0,05	0,001	0,005
Возможно серьезное отравление через 30 минут	0,05...0,30	0,005	0,008...0,015
Опасно для жизни при кратковременном воздействии	0,50...0,80	0,015	0,060

Котельные установки, которые имеют многие предприятия, относятся как к крупным потребителям топливно-энергетических ресурсов, так и к крупным источникам выбросов загрязняющих веществ [132-134]. За эти выбросы предприятия производят уплату экологического налога. Согласно Налоговому кодексу Республики Беларусь (Особенная часть) от 29 декабря 2009 г. № 71-3 [140] (с учетом изменений и дополнений, включая Указ Президента Республики Беларусь от 25 января 2018 г. № 29) ставки экологического налога за выбросы загрязняющих веществ в атмосферный воздух суммарно за 1 тонну веществ составляют (BYN): второго класса опасности – 964,61; третьего класса опасности – 318,88; четвертого класса опасности – 158,45 [136].

Обращает на себя динамика роста экологического налога. На рисунке 5.6.1 представлено изменение отношения ставки экологического налога за выброс загрязняющих веществ в атмосферный воздух по годам к ставке, действовавшей в 2008 году для второго класса опасности (для других классов опасности соотношение практически такое же). За 10 лет ставка выросла более чем в 6 раз. Это должно

мотивировать предприятия на снижение выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух.



Рисунок 5.6.1. – Изменение отношения ставки экологического налога за выброс загрязняющих веществ в атмосферный воздух i -го года к ставке, действовавшей в 2008 году

Образующиеся при работе котельных установок загрязняющие вещества соответствуют следующим классам опасности: второй – азот (IV) оксид (азота диоксид); углеводороды ароматические – второй; азот (II) оксид (азота оксид) – третий; сера диоксид (ангидрид сернистый, сера (IV) оксид, сернистый газ) – третий; твердые частицы (недифференцированная по составу пыль/аэрозоль) – третий; углерод черный (сажа) – третий; углеводороды предельные алифатического ряда $C_1...C_{10}$ – четвертый; углеводороды предельные алифатического ряда $C_{11}...C_{19}$ – 4; углерод оксид (окись углерода, угарный газ) – четвертый [137]. Для многих предприятий уплата экологического налога за выбросы загрязняющих веществ в атмосферный воздух является существенной статьей расходов и одной из причин перевода котельных установок с мазута на природный газ.

Использование природного газа в качестве топлива в котельных установках исключает загрязнение атмосферы диоксидом серы и твердыми частицами. В то же время происходит непрерывное загрязнение атмосферы продуктами сгорания газообразного топлива (в основном диоксидами азота) [138].

Оксиды и диоксиды азота, считает В. А. Кириллин [139], образуются при сжигании топлива в зонах высокой температуры.

Исследования, проведенные под руководством Я. Б. Зельдовича [140], показали, что сокращение времени выгорания капель топлива в два раза приводит к снижению концентрации NO_x на 22%. Таким образом, сокращение времени пребывания продуктов горения в высокотемпературной зоне топки котла приводит к снижению концентрации оксидов азота.

В Республике Беларусь от стационарных источников в 2016 году было выброшено в атмосферу 50,8 тыс. тонн диоксида азота, что на 3,04% больше, чем в 2015 году; оксида азота – 5,9 тыс. тонн, что на 3,51% больше, чем в 2015 году [141]. Это оказало негативное влияние на состояние окружающей среды.

Для улучшения экологической обстановки в районе работы котельных установок необходимо стремиться не только к подавлению образовавшихся вредных веществ, но в большей мере к локализации их появления. Одним из способов снижения образования вредных веществ (оксиды азота и оксид углерода (II)) в процессе горения газообразного топлива является впрыск воды или пара в топочную камеру [142]. При этом снижение концентрации пропорционально величине впрыска.

По мнению И. Я. Сигала [131], ввод воды или водяного пара в топливно-воздушную смесь влияет на процесс горения и образования NO_x не в меньшей мере, чем ввод аналогичного по объему количества рециркулирующих газов. Водяные пары оказывают сильное угнетающее воздействие на синтез оксидов азота, так как, возможно, имеет место влияние паров воды на кинетику образования NO_x . Предпосылкой этому служит тот факт, что водяные пары влияют на скорость распространения пламени, следовательно, ввод даже небольшого количества водяных паров в ядро зоны горения должен заметно влиять на выход оксидов азота. Данная гипотеза была экспериментально подтверждена В. И. Чеботарёвым [143] как в лаборатории кафедры теплогазоснабжения Донского государственного технического университета, так и на производственных объектах. Однако в промышленных масштабах данный метод практически не используется. Это объясняется двумя причинами. Во-первых, по данным Я. Б. Зельдовича [140] и И. Я. Сигала [131], при снижении температуры факела снижается коэффициент полезного действия (КПД) котла, а значит, необходим дополнительный объем топлива. Во-вторых, по данным В. И. Чеботарёва [143], часто возникают случаи неустойчивого горения.

Из изложенного выше следует, что на предприятиях, с одной стороны, образуются HCO и CB , содержащие НП, разделение которых на НП и воду требует значительных капитальных и текущих затрат, а с другой – добавление воды к топливу, сжигаемому на котельных установках предприятия, позволяет уменьшить выброс в атмосферу оксидов

азота NO_x и оксида углерода (II), а также не только компенсировать потери основного топлива, но и обеспечить его экономию.

Выводы. 1. Необходимо снизить негативного влияния НСО машиностроительного предприятия на здоровье работающих и окружающую среду с учетом постоянно ужесточающихся в Республике Беларусь и за рубежом требований охраны труда и экологического законодательства.

2. Сравнительно небольшие объемы НСО многих машиностроительных предприятий остро ставят проблему их утилизации, так как установка специализированного оборудования по переработке и утилизации этих отходов, как правило, экономически нецелесообразна. Для предотвращения возможного в связи с этим нелегального сброса НСО в окружающую среду необходимо проведение исследований по поиску способов использования этих отходов непосредственно на предприятии или на других предприятиях данного региона.

3. Наиболее эффективными направлениями переработки НСО являются те, которые позволяют повторное использование их материала по новому назначению при безусловном обеспечении требований безопасности труда без загрязнения окружающей среды.

4. Промышленные эмульсии и эмульсолы, используемые в качестве покрытий при производстве железобетонных изделий, являются дорогостоящими материалами. Применение покрытий на основе НСО при сохранении требований к качеству материала позволит обеспечить конкурентоспособность продукции данных предприятий за счет уменьшения себестоимости продукции.

5. Добавление воды к топливу, сжигаемому на котельных установках предприятия, должно уменьшить выброс в атмосферу оксидов азота NO_x и оксида углерода (II). Данное предположение позволяет считать перспективным направление разработки технологии использования эмульсии на основе НСО в качестве добавки к топливу, сжигаемому в котельных установках, для уменьшения экологической опасности для почвы, водного и воздушного бассейнов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При разработке методологии исследования процесса резания материалов должны учитываться:

1) общие тенденции циклического развития экономики – технологические уклады; наличие в стране одновременно нескольких технологических укладов; необходимость устойчивого развития – баланса природы и цивилизации, инноваций и восприимчивости к ним экономики;

2) концепции обобщения достижений науки в различных сферах деятельности (естествознании и философии), связь науки, образования («университет 1,0» ÷ «университет 4,0») и промышленности («индустрия 1,0» ÷ «индустрия 4,0»); развитие объединяющих (природоподобных) технологий – НБИК (нано, био-, инфо-, когно-) технологий;

3) результаты глубоких исследований строения материи и физико-химических процессов – частицы Хигса, наличие трех и более осей симметрии в кристаллах и других достижений.;

4) индивидуализация мелкосерийного многономенклатурного производства изделий на основе интернет-технологий, облачных технологий, искусственного интеллекта, нейронных сетей и т.п.; переход от типовых и групповых технологий к гибким модульным и мобильным технологиям; развитие трех-, четырех- и пятимерных технологий, аддитивных и гибридных технологий, автоматизации и роботизации производства;

5) повышение требований к качеству изделий, обеспечение точности деталей на наноуровне; развитие новых материалов деталей и инструментов, в том числе покрытий;

6) систематизацию обработки резанием; создание обобщенных кинематических схем резания; универсальные принципы формообразования поверхностей; моделирование явлений процесса резания; разработка многофункциональных станков и технологической оснастки, обеспечивающих на одном рабочем месте обработку различных конструктивных элементов и поверхностей деталей с наивысшей производительностью и точностью;

7) развитие высокоскоростной обработки материалов лезвийным режущим инструментом, изменение физических и химических явлений процесса высокоскоростного резания по сравнению с традиционным;

8) оптимизация и управление функционированием технологической системы по комплексному критерию (производительность, качество и себестоимость).

Разработанные методики и модели позволяют проводить комплексные исследования работоспособности сборных режущих инструментов и, в частности, оценивать целесообразность принимаемых технических решений по совершенствованию конструкций фрезерных и осевых инструментов:

- использованию обтекаемых корпусов в виде двух сопрягаемых торов;
- выполнению стружкоотводящих канавок, учитывающих направления схода стружки и потока охлаждающей жидкости или воздуха;
- введению в конструкцию балансирующих механизмов в виде уравновешивающих грузов и дисков с кольцевыми и спиральными канавками;
- повышению точности и качества получаемых конструктивных элементов и поверхностей с учетом теплового расширения и усадки полимерного материала;
- применению «гибридных» конструкций сборных режущих инструментов и технологий их изготовления, включающих пластиковые корпуса из высокопрочных полимеров и металлические резцовые вставки с механизмами зажима;
- оценки экономической эффективности традиционных, аддитивных и гибридных конструкций и технологий.

Предложен следующий алгоритм расчета направлений схода стружки и потоков смазочно-охлаждающей технологической среды (расположение стружко-потокоотводящих канавок):

- 1) исходя из заданных значений глубины резания, подачи и скорости резания определяются составляющие силы резания – главная P_z , радиальная P_y , осевая P_x , и их соотношения P_y/P_z , P_x/P_z ;
- 2) определяется нормальная сила N и угол наклона режущей кромки λ ;
- 3) определяется угол схода стружки η_c с учетом λ и N ;
- 4) рассчитывается скорость схода стружки v_c исходя из заданных значений скорости резания v и усадки стружки k ;
- 5) рассчитывается угол схода стружки η_c с учетом скорости схода стружки v_c и действующей силы N ;
- 6) рассчитываются значения изменений координаты δy , определяющие направление потока смазочно-охлаждающей технологической среды с учетом коэффициента вязкости среды μ , площади поверхности режущей пластины S , контактирующей с технологической средой, линейной скорости потока (схода стружки) и силы сопротивления среды F (нормальной силы N);

7) полученные значения η_c и δ_u выбираются в качестве оптимальных, определяющих расположение стружко-потокоотводящих канавок в корпусе блочно-модульной фрезы.

Кинематический анализ различных схем обработки плоских, цилиндрических, сферических, винтовых (резьбовых) поверхностей деталей показывает, что им присуще движение режущей кромки по касательной к поверхности резания или обрабатываемой поверхности детали, характеризуемые соответствующими направлением и величиной линейной скорости резания. При этом возможно изменение значений геометрического угла наклона режущей кромки вращающегося инструмента в пределах от 0° до 90° за счет угла установки оси вращения детали или инструмента и положения основной плоскости в кинематической системе координат. Наличие касательного движения и трансформация угла наклона режущей кромки приводят к существенным изменениям физических характеристик процесса резания.

Выведенные формулы для расчета механических характеристик процесса резания позволяют учитывать зависимость силы резания от угла наклона режущей кромки для различных условий обработки – с увеличением угла наклона режущей кромки инструмента сила резания уменьшается. С учетом радиальной и осевой составляющих силы резания значения нормальной силы резания при малых значениях угла наклона режущей кромки ($\lambda < 30^\circ$) несколько снижается. При больших значениях λ рекомендуется реализовывать кинематические схемы плунжерного фрезерования, ротационного резания и т.п.

Разработанные технологические схемы сборки блока резцового, фрезы торцовой, головки расточной обеспечивают формирование баз данных по их основным конструктивным элементам для автоматизированного проектирования блочно-модульных режущих инструментов.

Предложенные модели и алгоритмы позволяют определить:

- положение и ориентацию режущих, опорных стружколомающих и других элементов режущей части относительно посадочного гнезда блока резцового и модуля корпусного;
- положение и ориентацию посадочного гнезда блока резцового или модуля корпусного относительно установочной базы корпуса инструмента;
- параметры установки модуля корпусного на станке второго порядка для изготовления пазов и отверстий под ПР, ПО или БР;
- взаимное расположение компонентов вне зависимости от их числа и первоначальной ориентации в местных системах координат.

Получена математическая модель расчета напряжений и перемещений в БМРПИ, позволяющая оптимизировать геометрические параметры винта и разрезной втулки в механизмах настройки режущих лезвий.

Установлены зависимости напряжений и перемещений в деталях и соединениях модулей от нагрузок на механизм настройки, позволяющие научно обосновать уменьшение зазоров в резьбовом соединении для повышения точности и жесткости инструмента.

Рекомендуется для создания требуемого натяга в резьбовом соединении предварительное сжатие резьбовой втулки со следующими размерами пазов: глубиной – $4/5$ от диаметра втулки, равными значениями ширины и шага в диапазоне их размеров от одного до двух шагов резьбы.

Разработана инструментальная система и новые конструкции блочно-модульных расточных головок, патронов и резцовых вставок, отличающихся повышенной точностью и жесткостью.

Проведенный анализ исследований степени сложности изделий машиностроение показал достоинства и недостатки методик оценки степени сложности, а также то, что применяемые теоретические подходы и методики разнообразны и трудоемки в практическом применении. Отмечен факт отсутствия единой методики оценки степени сложности, что приводит к различного вида неточностям и погрешностям при попытке интерпретировать результаты исследований и расчетов. Предложено оценивать затраты на разработку модульных конструкций технологического оснащения производства с учетом их степени сложности.

Предложен обобщающий показатель степени сложности, который базируется на действующих стандартах и нормативных документах и позволяет проанализировать изделия и технологии с точки зрения рациональности их проектирования, изготовления и применения. Разработана математическая модель сложности объектов и процессов, которая включает конструктивные, технологические и функциональные характеристики, и основывается на ограничительных перечнях типоразмеров, параметров изделий и техпроцессов с учетом их наибольшей применяемости в производстве.

Предложены структурные схемы формирования БМФ и выбора метода их изготовления, отличительными особенностями которых является применение унифицированных конструкций блоков резцовых и корпусных модулей, субтрактивных, аддитивных и «гибридных» технологий, что обеспечивает использование рационального варианта исполнения сборного режущего инструмента, учитывающего условия обработки разнообразных поверхностей и конструктивных элементов деталей на станках с ЧПУ;

Разработаны конструкции блоков резцовых, модулей корпусных и балансировочных, отличающегося оригинальными механизмами закрепления пластин режущих и статической балансировки, обтекаемыми формами поверхностей конструктивных элементов, что обеспечивает повышение надежности и точности БМФ в процессе резания;

Разработаны технологические маршруты изготовления фрез, включающие подготовку к 3D печати, 3D печать и постобработку, подробное описание операции 3D печати, а также технологическую схему сборки БМФ, что позволяет рекомендовать аддитивную технологию для получения экспериментальных образцов сборных режущих инструментов на этапе подготовки серийного производства;

Полученные результаты экспериментальных исследований влияния усадки пластиковых материалов различных марок на линейные и угловые размеры деталей БМФ, включающие оценку отклонений от номинальных значений и погрешностей относительно размеров, заданных на чертежах деталей, позволили рекомендовать для изготовления экспериментальных образцов БМФ пластиковые материалы марок SBS и PLA.

Предложено использование функционального проектирования кинематической структуры станочного оборудования с ЧПУ, содержащего сложные мехатронные формообразующие группы, по закону его функционирования, задаваемому соответствующим виртуальным техническим решением - способом формообразующей обработки. Предложена методика настройки мехатронных формообразующих групп на траекторию сложного формообразующего движения и его скорость.

Необходимо снизить негативного влияния НСО машиностроительного предприятия на здоровье работающих и окружающую среду с учетом постоянно ужесточающихся в Республике Беларусь и за рубежом требований охраны труда и экологического законодательства.

Сравнительно небольшие объемы НСО многих машиностроительных предприятий остро ставят проблему их утилизации, так как установка специализированного оборудования по переработке и утилизации этих отходов, как правило, экономически нецелесообразна. Для предотвращения возможного в связи с этим нелегального сброса НСО в окружающую среду необходимо проведение исследований по поиску способов использования этих отходов непосредственно на предприятии или на других предприятиях данного региона.

Наиболее эффективными направлениями переработки НСО являются те, которые позволяют повторное использование их материала по новому назначению при безусловном обеспечении требований безопасности труда без загрязнения окружающей среды.

Промышленные эмульсии и эмульсолы, используемые в качестве покрытий при производстве железобетонных изделий, являются дорогостоящими материалами. Применение покрытий на основе НСО при сохранении требований к качеству материала позволит обеспечить конкурентоспособность продукции данных предприятий за счет уменьшения себестоимости продукции.

Добавление воды к топливу, сжигаемому на котельных установках предприятия, должно уменьшить выброс в атмосферу оксидов азота NOx и оксида углерода (II). Данное предположение позволяет считать перспективным направление разработки технологии использования эмульсии на основе НСО в качестве добавки к топливу, сжигаемому в котельных установках, для уменьшения экологической опасности для почвы, водного и воздушного бассейнов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Электронный ресурс. [https://ru.wikipedia.org/wiki/Технологический уклад](https://ru.wikipedia.org/wiki/Технологический_уклад).
2. Глазьев С.Ю., Львов Д.С., Фетисов Г.Г. Эволюция технико-экономических систем: возможности и границы централизованного регулирования. – М.: Наука, 1992. – 207 с.
3. Перес К. Технологические революции и финансовый капитал: Динамика пузырей и периодов процветания. – М.: Дело, 2011 – 232 с.
4. Электронный ресурс. [https://ru.wikipedia.org/wiki/Третья волна \(Тоффлер\)](https://ru.wikipedia.org/wiki/Третья_волна_(Тоффлер)).
5. Патрик де Вос. Информация как суть четвертой промышленной революции. – «Станочный парк», 2017. – с.29-31.
6. Электронный ресурс. <https://ru.wikipedia.org/wiki/Конвергенция>.
7. Электронный ресурс. [https://ru.wikipedia.org/wiki/Устойчивое развитие](https://ru.wikipedia.org/wiki/Устойчивое_развитие).
8. Попок Н.Н. Мобильная реорганизация машиностроительного производства. – Минск, УП «Технопринт», 2001. – 396 с.
9. Конструирование и оснащение технологических комплексов / А.М. Русецкий, Н.Н. Попок [и др.]; под общ. ред. А.М. Русецкого. – Минск: Беларус. навука, 2014. – 316 с.
10. Грановский Г.И. Кинематика резания. – М.: Машгиз, 1948. – 199с.
11. ГОСТ 25761-83. Виды обработки резанием. Термины и определения общих понятий.
12. ГОСТ 25762-83. Обработка резанием. Термины, определения и обозначения общих понятий.
13. ГОСТ 25751-83. Инструменты режущие. Термины и определения общих понятий.
14. Попок, Н.Н., Хмельницкий, Р.С., Черневич М.В. Анализ особенностей кинематики и геометрии процесса высокоскоростного резания // Материалы междунар. научно–техн. конф. «Технология-оборудование-инструмент-качество». – Минск: Бизнес-софсет, 2014. – с.93-95.
15. Бобров В.Ф. Влияние угла наклона главной режущей кромки инструмента на процесс резания металлов. – М.: Машгиз, 1962. – 152с.
16. Бобров В.Ф. Иерусалимский Д.Е. Резание металлов самовращающимися резцами. – М.: Машиностроение, 1972. – 111с.

17. Попок Н.Н. Исследование процесса ротационного резания принудительно вращающимися инструментами. – Дисс. на соиск. уч. ст. канд. техн. наук, Минск. 1983 – 274 с.
18. Рейхель В. Методика определения стойкости резца и обрабатываемости материала. – Миротехника №4, 1936. – с. 6-14.
19. Макаров А.Д. Оптимизация процессов резания. – М.: Машиностроение, 1976. – 278 с.
20. Хмельницкий Р.С., Анисимов В.С., Гвоздь Г.И. Автоматизация станочного оборудования для высокоскоростной обработки резанием / Материалы VI междунаучно-практ. конф. «Инновационные технологии, автоматизация и мехатроника в машино- и приборостроении» (ред. кол.: Малярович А.М. (гл. ред.) [и др.]. – Минск: Бизнессофсет, 2018. – с. 111-112.
21. Новоселов Ю.К., Попок Н.Н. Методологические основы и пути разработки САПР ротационного резания / «Известия вузов. Машиностроение». изд. МВТУ им. Н.Э. Баумана, №5, 1987. – с. 125–128.
22. Попок Н.Н. Теоретические и технологические основы мобильного многономенклатурного производства и интенсификацией механической обработки поверхностей деталей типа тел вращения. – Дисс. на соиск. уч. ст. доктора техн. наук, Минск, 2002. – 341 с.
23. Пашкевич В.М. Повышение точности механической обработки и сборки изделий машиностроительного производства на основе построения и использования компьютерных обучающих систем / Автореф. дисс. на соиск. уч. ст. доктора техн. наук, Минск, 2007. – 46 с.
24. Гулаков К.В. Моделирование многомерных объектов на основе когнитивных карт с нейросетевой идентификацией параметров. – Автореферат дисс. на соиск. уч. ст. канд. техн. наук, Брянск, 2013. – 19 с.
25. Кабалдин Ю.Г., Шатагин Д.А., Кузьмишина А.М. Управление технологическим оборудованием предприятия в условиях цифровых производств на основе искусственного интеллекта и облачных технологий. – МА и ППСиМ, Нижний Новгород, №1, 2018. – с. 15–26.
26. Попок Н.Н. Методология и исследования процесса резания материалов в современных условиях развития машиностроения/ Вестник ПГУ, сер. В. Промышленность. Прикладные науки. №3, 2019 г. – с. 21-30.

27. Попок Н.Н. Анализ тенденций проектирования инструментальных систем. Ч.3 Инструментальные системы для многоцелевой обработки/Вестник ПГУ, сер. В. Промышленность. Прикладные науки. №3, 2013 г. – с. 19-37.
28. С.М. Белоцерковский, М.И. Ништ, В.Н. Котовский, Р.М. Федоров. Трехмерное отрывное обтекание тел произвольной формы. М. : Центр. аэродинам. ин-т им. Н.Е. Жуковского, 2000. — 260 с.
29. Андронов П.Р., Гувернюк С.В, Дынникова Г.Я. Вихревые методы расчета нестационарных гидродинамических нагрузок. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 2006.-184 с.
30. Бобров В.Ф. Влияние угла наклона главной режущей кромки инструмента на процесс резания металлов. 1962 – 152 с.
31. Грубый С.В. Расчетные параметры стружкообразования при несвободном косоугольном резании пластичных материалов. С 4 – 15.
32. Технология FDM печати конструкции блочно-модульной торцевой фрезы/ Попок Н.Н., Портянко С.А.. Материалы международной научно-технической конференции молодых ученых «Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности» - Могилёв, 24-25 октября 2019 г. с. 38.
33. 3D моделирование конструкций блочно-модульных торцевых фрез/ Попок Н.Н., Портянко С.А., Информационно-коммуникационные технологии: достижения, проблемы, инновации (ИКТ-2018) [Электронный ресурс] : электронный сборник статей I международной научно-практической конференции, посвященной 50-летию Полоцкого государственного университета, Новополоцк, 2018 г., с. 190-192.
34. 3D макетирование сборных режущих инструментов для высокоскоростной обработки/ Н.Н. Попок, С.А. Портянко. Материалы 34-ой Международной научно-технической конференции «Перспективные направления развития технологии машиностроения и металлообработки» - Минск: БНТУ, 2019 г. – с. 97-98.
35. Оценка параметров точности и шероховатости поверхностей деталей блочно-модульного режущего инструмента, полученных 3D печатью/ Попок Н.Н., С.А. Портянко, В.С. Анисимов, Л.Н. Косяк. Материалы 35-ой международной научно-технической конференции «Технология – Оборудование – Инструмент – Качество». - Минск: БНТУ, 2020 г. с. 12-13.
36. Подготовка машиностроительного производства на основе 3D-прототипирования технологической оснастки/ Попок Н.Н., Портянко С.А.. Инновационные технологии в машиностроении (ИнТехМаш-2020) [Электронный ресурс] : электронный сборник статей материалов международной научно-практической конференции, посвященной 50-летию машиностроительных специальностей и 15-летию

научно-технологического парка Полоцкого государственного университета, Новополоцк, 21-22.04.2020 г., с. 40-41.

37. Автоматизация подготовки производства на основе 3D макетирования технологической оснастки/ Н.Н. Попок, С.А. Портянко, Материалы VIII международной научно-практической конференции «Инновационные технологии, автоматизация и мехатроника в машино- и приборостроении» - Минск: БНТУ, 2020 г. – с. 100.

38. Высокоскоростная обработка [электронный ресурс]. <http://insoftmach.ru/HSC.html> – дата 24.10.2017.

39. Филиппов Г.В.. Режущий инструмент. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отделение, 1981. — 392 с.

40. ГОСТ 17025-19. Фрезы концевые с цилиндрическим хвостовиком.

41. DIN6527L. Фрезерный инструмент «Guhring».

42. Деформация и стружкообразование при обработке плоских и криволинейных поверхностей деталей вращающимся режущим инструментом на токарных и фрезерных станках с ЧПУ / Н. Н. Попок, В. А. Анисимов // Вестн. Полоцк. гос. ун-та. Серия В, Прикладные науки. Промышленность. – 2020. – №10. – С. 28-34.

43. Методология исследования работоспособности фрезерных и осевых режущих инструментов на основе 3D прототипирования / Н.Н. Попок, С.А. Портянко // Вестн. Полоцк. гос. ун-та. Серия В, Прикладные науки. Промышленность. – 2020. – №11. – С. 29-39.

44. Некрасов Р. Ю. Теплофизика и гидравлика в технологических системах нефтегазового оборудования: учебник / Р. Ю. Некрасов, Л. К. Габышева, У. С. Путилова и др. – Тюмень: ТюмГНГУ, 2014. – 172 с.

45. ГОСТ 25762. Обработка резанием. – М.: Изд-во стандартов, 1983. – 24с.

46. Коновалов, Е.Г. Прогрессивные схемы ротационного резания металлов / Е.Г.Коновалов, В.А.Сидоренко, А.В. Соусь– Мн.: «Наука и техника», 1972. – 272с.

47. Землянский, В.А. Обработка высокопрочных материалов инструментами с самовращающимися резцами / В.А.Землянский, Б.В.Лупкин– Киев: Техника, 1980. – 120с.

48. Кушнер, И.С. Круглые вращающиеся резцы /И.С.Кушнер, В.В. Ледаев //В.Кн.: Эффективные режущие и мерительные инструменты. – Куйбышев: Куйбышевское кН. Изд-во, 1966. – с. 40-49.

49. Каширин, А.Н. Резание металлов принудительно вращающимся резцов системы Л.М. Ронин и А.Н. Каширин /А.Н.Каширин, Л.М.Ронин– Изв. АН СССР, ОТН,№7, 1940. – с. 39-46.

50. Новоселов, Ю.А. Оптимизация процесса резания на основе сопоставительного анализа взаимосвязи выходных характеристик / Ю.А. Новоселов, Н.Н. Попок – Изв. Вуз.Машиностроение, №5, 1989. – с. 149-153.
51. А.С. №1187919 Способ обработки с оптимизацией режимов резания /П.И.Ящерицын, Ю.А.Новоселов, Н.Н.Попок // В23В1/00, Г.И.№40, 30.10.85, заявка от 21.07.82.
52. Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х т. Т.2/Под ред. А.М. Дальского, А.Г. Косиловой, Р.К. Мещерякова, А.Г. Сулова.– 5-е изд., перераб. и доп. – М.:Машиностроение-1, 2001. – 912 с., ил.
53. Merchant M. E., Basic Mechanics of the Metal Cutting Process, Transaction of the ASME, vol 66, 1944.
54. Попок, Н.Н. Кинематика обработки поверхностей деталей вращающимся режущим инструментом с касательным движением режущей кромки/ Н.Н. Попок, В.С. Анисимов// Вестник ПГУ, сер. В., № 11 , 2019. – с. 31-38
55. Брикс А.А. Резание металлов (строгание) / А.А. Брикс – С.-Петербург, 1896.
56. Патент ВУ19260. Способ установки сменной режущей пластины в режущем инструменте, Попок Н.Н., Терентьев В.А., Хмельницкий Р.С., Сидикевич А.В., Сопиков И.Я. // Заявка на изобретение № а 20110025 от 06.01.2011. С1МПКВ23В27/16.
57. Патент ВУ19226. Режущий инструмент / Попок Н.Н., Терентьев В.А., Хмельницкий Р.С., Сидикевич А.В., Сопиков И.Я. // Заявка на изобретение № а 20110026 от 06.01.2011. С1МПКВ23В27/16.
58. Таратынов О.В. Проектирование и расчет металлорежущего инструмента на ЭВМ: учеб. пособие для вузов / О.В. Таратынов, Г.Г. Земсков, Ю.Л. Тарамыкина, – М.: Высш. шк., – 1991, – 423 с.
59. Гуляев Ю.Б. Повышение эффективности технологической подготовки производства на основе автоматизированного проектирования и выбора сборных торцовых фрез / Автореферат дисс. на соиск. уч.ст. канд. техн. наук, М., 2006г., – 24с.
60. Попок Н.Н. Обоснование классификации режущих инструментов по конструктивным, технологическим и функциональным признакам / Машиностроение Вып. 21, в 2-х томах, т.1, 2005, с.143-150.
61. Herasimau, N. Papok. Cartridge toolholders and boring heads for high-precision holes treatment// Materials of VI junior researchers' conference, 2012, p.91 – 94.
62. Патент № 9108 РБ, МПК В23В29/00. Расточной инструмент.
63. Шарин Ю.С., Старцева Т.В. Новый метод нормирования мехобработки // Машиностроитель. – 1999.- №1.- С.35-36

64. Раскин П.Н., Коршунов А.И. Оценка конструктивно-технологической сложности при прогнозировании трудоемкости и затрат на ранних стадиях его жизненного цикла. – Воткинский филиал им. ГТУ. 2008 г.
65. Толмачев В.Г., Якимович Б.А., Коршунов А.И. Оценка эффективности функционирования производственных систем на основе показателя сложности. Вестник ИжГТУ. – Ижевск: Изд-во ИжГТУ, 1998. – №1. – С. 66-68.
66. Якимович Б.А., Коршунов А.И. Экспертные методы оценки структурно-параметрической сложности деталей// Информатика. Машиностроение.- М.: Машиностроение, 1997.-№3.-С.28-32
67. Шарин Ю.С. Технологическое обеспечение станков с ЧПУ. – М.: Машиностроение, 1986г. – 176 с.
68. Якимович Б.А. Коршунов А.И. Сложность деталей машиностроения и эффективное функционирование производственной системы // Избранные данные записки ИжГТУ, в 3т. – Ижевское издательство ИжГТУ, 1998, т.2, с. 55-61.
69. Якимович Б.А. Коршунов А.И. Определение показателей трудоемкости изготовления корпусных деталей в условиях автоматизированного производства // Вестник машиностроения. – М.: Машиностроение. – 1996. № 8, с. 41-45.
70. Шарин Ю.С., Поморцева Т.Ю. Теория сложности и ее использование в машиностроении. – Екатеринбург: Свердловский УНТИ, 1995.– 237 с.
71. Научная школа «Моделирование сложных технических систем» [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://www.pro18.ru/index.php?option=com_content&view=article&id=295:2012-02-17-04-02-38&catid=73:2012-02-11-04-56-18&Itemid=336 дата доступа : 30.09.2015
72. Автоматизированное проектирование и производство в машиностроении / Ю.М. Соломенцев, В.Г. Митрофанов, А.Ф. Прохоров и др.: Под общ. ред. Ю.М. Соломенцева, В.Г. Митрофанова.- М.: Машиностроение, 1986.-256 с.
73. Системы автоматизированного проектирования; в 9-ти кн. Кн. 9. Иллюстрированный словарь: Учеб. пособие для вузов / Д.М. Жук, П.К. Кузьмин, В.Б. Маничев и др.: Под ред. И.П. Коренкова – М.: Высшая школа, 1986.-156 с.
74. Гамрат-Курек Л.И. Экономическое обоснование дипломных проектов: Учебн. пособие. – М.: Высшая школа, 1974. – 190 с.
75. Кочубей Н.К. Практические расчеты экономической эффективности унификации изделий // Вопросы механики и машиностроения, том 17 С. 159-178.
76. Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики. Электронная информационно-

образовательная среда [Электронный ресурс]. Режим доступа : http://de.ifmo.ru/bk_netra/page.php?dir=1&tutindex=18&index=21&layer=1 дата доступа : 14.04.2015

77. Севрюгин А.С. Определение трудоемкости изготовления машин при их проектировании // Машиностроитель, 1990, №2, с. 31

78. ГОСТ 7505-89. Поковки стальные штампованные.

79. Троицкий Д.И. Количественная оценка сложности машиностроительных деталей // Оборудование и инструмент для профессионалов. - 2011. - №3. - С. 62-65.

80. Ерёмин А.А., Троицкий Д.И. Поэлементный метод оценки конструктивной сложности деталей. Известия Тульского государственного университета. Технические науки № 12-1 / 2013 ,с 254-260

81. В. Л. Доброскок, Ю. Б. Витязев, Л. Н. Абдурайимов Високі технології в машинобудуванні = High technologies of machine-building : // зб. наук. пр. – Харків : НТУ "ХПІ", 2012. – Вип. 1 (22). – С. 94-107.

82. Об утверждении Положения о порядке выполнения работ (оказания услуг) по технической защите информации. Приказ государственного центра безопасности информации при президенте Республики Беларусь 26 июля 2007 г. № 8

83. МДС 81-27.2007 Методические рекомендации по применению государственных элементных сметных норм на пусконаладочные работы, федеральное агентство по строительству и жилищно-коммунальному хозяйству (Росстрой), 2007 г

84. Попок, Н.Н. Методология исследования процесса резания материалов в современных условиях развития машиностроения / Н.Н. Попок // Вестн. Полоцк. гос. ун-та. Серия В, Прикладные науки. Промышленность. – 2019. – № 10. – С. 21–30.

85. Грубый, С.В. Моделирование процесса резания твердосплавными и алмазными резцами / С.В. Грубый. – Москва : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. – 107 С.

86. Грубый, С.В. Оптимизация процесса механической обработки и управление режимными параметрами / С.В. Грубый. – Москва : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. – 149 С.

87. Режущий инструмент со сменной режущей пластиной: пат. 19226 Респ. Беларусь, МПК В 23В 1/00, 27/00. / Н.Н. Попок, В.А. Терентьев, Р.С. Хмельницкий, А.В. Сидикевич, И.Я. Сопиков ; заявитель Полоц. гос. ун-т. – № а.20110026; заявл. 06.01.2011.

88. Голембиевский А.И. Современная парадигма познания металлорежущих станков /А.И. Голембиевский. – Новополоцк: Полоц. Гос. ун-т, 2021. – 224 с.

89. Голембиевский А.И. Эволюция развития сложных формообразующих групп металлорежущих станков / А.И. Голембиевский // Вест. Полоц. гос. ун-та. Серия В. Прикладные науки. – 2017. - № 11. С. 2 - 8.
90. Голембиевский А. Системология способов формообразующей обработки в машиностроении / А.И. Голембиевский. – Новополоцк: Полоц. гос. ун-т, 2017. – 236 с.
91. Устройство для синхронизации приводов исполнительных органов шлицефрезерного станка: пат.16976 (BY), В 23Q 15/00, В 23F 9/10 / А.И. Голембиевский: заявитель Полоц. гос. ун-т – опубл. 26.12.2012 // Афіцыйны бюл. / Нац.центр. інтэлектуал. уласнасці. – 2012.
92. Двухшаговый червяк: патент 2020326 (RU), F16H 1/16 / А.И. Голембиевский, В.А. Петров: заявитель Полоц. гос. ун-т; опубл. 1994 // Бюл. Изобретений. – 1994. – № 18.
93. Охрана окружающей среды в Республике Беларусь [Электронный ресурс] : статистический отчет. – Минск : Национальный статистический комитет Республики Беларусь, 2019. – Режим доступа : <http://www.belstat.by>. – Дата доступа : 30.07.2019. 17-30.
94. Иванов, В. П. Охрана труда рабочих и защита окружающей среды от вредного влияния нефтесодержащих отходов : научное издание / В. П. Иванов, В. А. Дронченко. – Новополоцк: ПГУ, 2016. – 248 с.
95. Основы общей экологии и международной экологической политики : учеб. пособие для вузов / Р. А. Алиев [и др.] ; МГИМО МИД России. – М. : Аспект Пресс, 2014. – 382 с.
96. Смазочные материалы и проблемы экологии / А.Ю. Евдокимов [и др.]. – М. : ГУП Издательство «Нефть и газ» РГУ нефти и газа им. И. М. Губкина, 2000. – 424 с.
97. Дронченко, В. А. Утилизация отработавших пластичных смазок / В. А. Дронченко // Горная механика и машиностроение. – 2015. – № 4. – С. 85 – 89.
98. Республика Беларусь Ежегодный статистический отчет [Электронный ресурс] : статистический ежегодник 2016. – Минск : Национальный статистический комитет Республики Беларусь, 2016. – Режим доступа : <http://www.belstat.by>. – Дата доступа : 17.08.2017. 14-30.
99. Чеботарев, П. А. Охрана атмосферного воздуха от загрязнения углеводородами нефтяного генеза и оценка риска их влияния на состояние здоровья населения / П. А. Чеботарев. – Барановичи : Барановичская укрупненная типография, 2005. – 152 с.
100. Fairbrother, A. Risk assessment: lessons learned / A. Fairbrother. – Environ. Toxicol. And Chem. – 2002. – Vol. 21, № 11. – P. 2261 – 2263.

101. Булавка, Ю. А. Гигиеническая характеристика условий труда на производстве смазочных масел и битумов / Ю. А. Булавка // Здоровье и окружающая среда: сб. науч. тр. / Респ. науч.-практ. центр гигиены; гл. ред. Л. В. Половинкин. – Минск : ГУ РНМБ, 2011. – Вып. 18. – С. 3 – 8.
102. Михайлов, Ю. М. Промышленная безопасность и охрана труда. // Справочник руководителя (специалиста) опасного производственного объекта : справочник / Ю. М. Михайлов. – М. : Альфа-Пресс, 2014. – 232 с.
103. Профессиональный риск для здоровья работников : руководство / под ред. Н. Ф. Измерова, Э. И. Денисова. – М. : Тровант, 2003. – 448 с.
104. Кученева, Е. Е. Снижение профессиональных рисков на основе комплексной системы управления безопасностью труда предприятия химической промышленности : дис. ... канд. техн. наук : 05.26.01 / Е. Е. Кученева. – Минск, 2009. – 130 с.
105. Сухонослова, А. Н. Совершенствование оценки класса опасности нефтесодержащих отходов и способа их обезвреживания : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 03.00.16 / А. Н. Сухонослова. – Уфа, 2009. – 18 с.
106. Хоружая, Т. А. Оценка экологической опасности / Т. А. Хоружая. – М. : Кн.–Сервис, 2002. – 203 с.
107. Дмитриева, Т. С. Методика оценки рисков выбросов промышленных предприятий и их влияние на величину ущербов : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 25.00.36 / Т. С. Дмитриева. – Тараз, 2010. – 19 с.
108. Евдокимов, А. Ю. Экологические проблемы утилизации отработанных смазочных материалов / А. Ю. Евдокимов, И. Г. Фукс. – М. : ЦНИИТЭнефтехим, 1989. – 64 с.
109. Чеботарев, П. А. Оценка риска производственно обусловленных заболеваний в производстве масел нефтеперерабатывающего предприятия : сб. науч. тр. / П. А. Чеботарев, Я. Ю. Ковалева, Ю. А. Булавка // Здоровье и окружающая среда. – Минск, 2009. – Вып. 13. – С. 229 – 234.
110. Булавка, Ю. А. Анализ заболеваемости с временной нетрудоспособностью работников производств смазочных масел, битумов и присадок / Ю. А. Булавка, П. А. Чеботарев // Здоровье и окружающая среда : сб. науч. тр. / М-во здравоохранения Респ. Беларусь, Респ. науч.-практ. центр гигиены, Белор. науч. о-во гигиенистов ; редкол. : Л. В. Половинкин [и др.]. – Минск : ГУ РНМБ, 2012. – Вып. 20. – С. 29 – 36.

111. Ефремова, О. С. Опасные и вредные производственные факторы и средства защиты работающих от них : практическое пособие / О. С. Ефремова. – М. : Альфа-Пресс, 2009. – 304 с.
112. Мажугин, Е.И. Центробежная очистка моющих растворов при ремонте сельскохозяйственной техники : монография / Е.И. Мажугин, А.Л. Казаков, А.В. Пашкевич. – Горки : БГСХА, 2015. – 185 с.
113. Литвинова, Т. А. Экологические аспекты обезвреживания и утилизации углеводородсодержащих отходов нефтегазового комплекса : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 03.02.08 / Т. А. Литвинова. – Краснодар, 2011. – 23 с.
114. Асаёнок, И. С. Среда обитания : риск, здоровье, экономика : монография / И. С. Асаёнок. – Минск : Бестпринт, 2006. – 221 с.
115. Стратегия устойчивого развития Беларуси: экологический аспект / Е. А. Антипова [и др.]. – Минск : ФУАинформ, 2014. – 336 с.
116. Костылева, Л. Н. Геоэкологический анализ и оценка риска загрязнения атмосферы : автореф. дис. ... канд. геогр. наук : 25.00.36 / Л. Н. Костылева. – Воронеж, 2009. – 24 с.
117. Иванов, В. П. Обеспечение безопасной работы оборудования нефтехимического комплекса : научное издание / В. П. Иванов, А. В. Крыленко. – Новополоцк : ПГУ, 2015. – 180 с.
118. Иванов, В. П. Утилизация нефтесодержащих отходов вспомогательного производства нефтехимических предприятий / В. П. Иванов, В. А. Дронченко // Природопользование: сб. науч. тр. / Ин-т природопользования НАН Беларуси. – Минск, 2016. – Вып. 30. – С. 136 – 145.
119. Пухов, Е. В. Совершенствование системы утилизации отходов предприятий технического сервиса транспортных и технологических машин АПК : автореф. дис. ... д-ра. техн. наук : 05.20.03 / Е. В. Пухов. – Воронеж, 2013. – 35 с.
120. Оборудование для приготовления, подачи, очистки и утилизации СОЖ: каталог. – М. : ИКФ Каталог, 1999. – 122 с.
121. Ставки экологического налога [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.pravo.by/document/?guid=12551&p0=P31800029&p1=1&p5=0>. – Дата доступа : 03.04.2018.
122. Евдокимов, А. Ю. Использование отработанных смазочных материалов в капиталистических странах / А. Ю. Евдокимов, И. Г. Фукс. – М. : ЦНИИТЭИМС, 1989. – 51 с.

123. Фитч, Дж. Анализ масел. Основы и применение: пер. с англ. / Дж. Фитч, Д. Тройер. – 2-е изд. – СПб. : Профессия, 2015. – 176 с.
124. Тельнов, Н. Ф. Ремонт машин / Н. Ф. Тельнов – М. : Агропромиздат, 1992. – 558 с.
125. Иванов, В. П. Технология, оснащение и организация ремонтно-восстановительного производства : учебник / В. П. Иванов [и др.]. – Старый Оскол : Тонкие наукоемкие технологии, 2015 – 551 с.
126. Гурвич, Л. М. Рекомендации по применению новых средств очистки машин и деталей при ремонте / Л. М. Гурвич. – М. : ГОСНИТИ, 1975. – 104 с.
127. Фокин, О. И. Совершенствование технологии регенерации моющих растворов на предприятиях технического сервиса агропромышленного комплекса : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.20.03 / О. И. Фокин ; ФГОУ ВПО МГАУ им. В. П. Горячкина. – М., 2009. – 19 с.
128. Каталог товаров. Смазка для опалубок [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.minsk.deal.by/Smazka-dlya-opalubki.html>. – Дата доступа : 11.10.2017.
129. Каталог цен на эмульсолы [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.marketoil.by/magazin/folder/zhidkostiformovochnye>. – Дата доступа : 01.11.2017.
130. Стырыкович, М. А. Энергетика и окружающая среда / М. А. Стырыкович // Теплоэнергетика. – 1975. – № 4. – С. 2–5.
131. Сигал, И. Я. Защита воздушного бассейна при сжигании топлива / И. Я. Сигал. – Л. : Недра, 1988. – 312 с.
132. Зоря, Е. И. Нефтепродуктообеспечение. Традиционные и альтернативные топлива : учеб. пособие для вузов / Е. И. Зоря, О. В. Лощенкова, Ю. Н. Киташов ; РГУ нефти и газа им. И. М. Губкина. – М. : ИЦ РГУ нефти и газа, 2012. – 527 с.
133. Охрана окружающей среды и природопользование. Атмосфера. Выбросы загрязняющих веществ в атмосферный воздух. Порядок определения выбросов при сжигании топлива в котлах теплопроизводительностью до 25 МВт : ТКП 17.08-01-2006. – Введ. 01.05.2006. – Минск : РУП «Бел НИЦ «Экология», 2006.
134. Установки котельные. Установки, работающие на газообразном, жидком и твердом топливе. Нормы выбросов загрязняющих веществ : СТБ 1626.1–2006. – Введ. 01.07.2006. – Минск : Беларус. гос. ин-т стандартизации и сертификации, 2006. – 8 с.
135. Кодекс Республики Беларусь о налогах (особенная часть) : принят 29 декабря 2009 г. : с изм. и доп., вступившими в силу с 01.07.2015, № 71-3. – Минск, 2015.

136. Ставки экологического налога [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.pravo.by/document/?guid=12551&p0=P31800029&p1=1&p5=0>. – Дата доступа : 03.04.2020.

137. Об утверждении классов опасности загрязняющих веществ в атмо-сферном воздухе и установлении порядка отнесения загрязняющих веществ к определенным классом опасности загрязняющих веществ: постановление Министерства здравоохранения Респ. Беларусь, 30 июн. 2009 г., № 76. – Минск, 2009.

138. Сигал, И. Я. Очистка промышленных выбросов от оксидов серы и азота / И. Я. Сигал, В. И. Славин, В. В. Шило. – Харьков: Оригинал, 1999. – 142 с.

139. Кирилин, В. А. Энергетика. Главные проблемы / В. А. Кирилин. – М. : Знание, 1990. – 128 с.

140. Зельдович, Я. Б. Окисление азота при горении / Я. Б. Зельдович, П. Я. Садовников, Д. А. Франк-Каменецкий. – М. : Наука, 1974. – 217 с.

141. Охрана окружающей среды в Республике Беларусь [Электронный ресурс] : статистический отчет. – Минск : Национальный статистический комитет Республики Беларусь, 2019. – Режим доступа : <http://www.belstat.by>. – Дата доступа : 30.07.2019. 17-30.

142. Исследование выхода окислов азота при сжигании топлива в факеле и псевдооживленном слое / И. Я. Сигал [и др.] // Теплоэнергетика. – 1975. – № 12. – С. 30 – 33.

143. Чеботарев, В. И. Оценка достоверности формулы изменения концентрации окислов азота / В. И. Чеботарев, Г. М. Кравченко // Вопросы теплообмена в строительстве. – 1989. – Ростов на Дону. – С. 62 – 64.