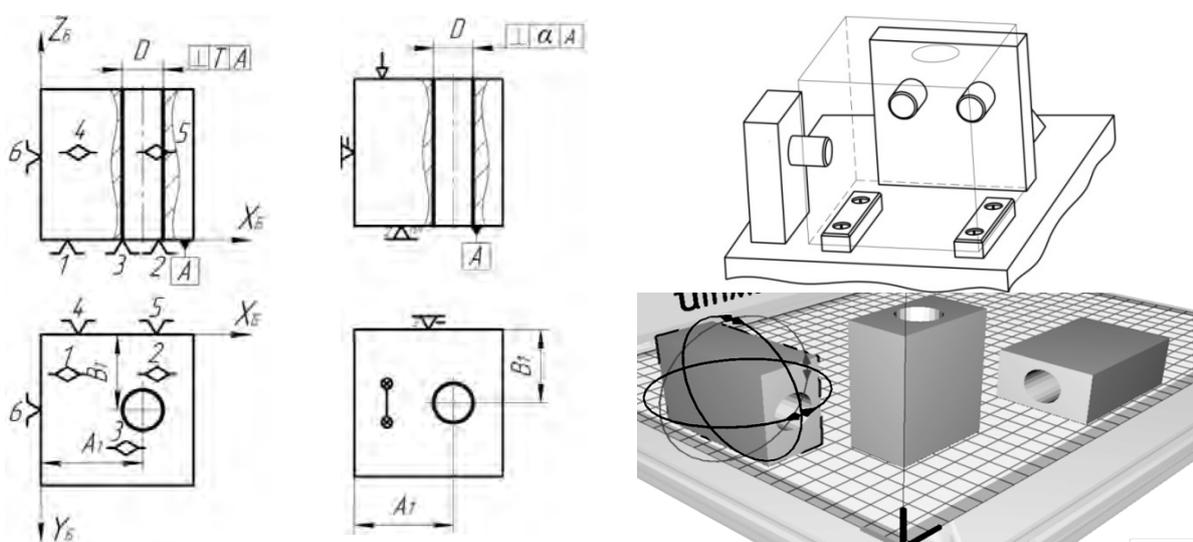


# ОСНОВЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТНОГО БАЗИРОВАНИЯ В СУБТРАКТИВНОМ И АДДИТИВНОМ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ ПРОИЗВОДСТВАХ

## МОНОГРАФИЯ



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ  
Учреждение образования  
«Витебский государственный технологический университет»

*Н. В. Беляков, Н. Н. Попок*

**ОСНОВЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО  
ПРОЕКТНОГО БАЗИРОВАНИЯ В  
СУБТРАКТИВНОМ И АДДИТИВНОМ  
МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ ПРОИЗВОДСТВАХ**

**МОНОГРАФИЯ**

Витебск  
2023

УДК 658.512:004.896

ББК 30.606.4

Б 43

*Рецензенты:*

начальник научно-технического центра  
«Технологии машиностроения и технологическое оборудование»  
государственного научного учреждения «Объединенный институт  
машиностроения Национальной академии наук Беларуси»,  
доктор технических наук, профессор  
Басинюк Владимир Леонидович;

профессор кафедры «Технологическое оборудование»  
Белорусского национального технического университета,  
доктор технических наук, профессор  
Данилов Виктор Алексеевич.

Рекомендовано к изданию научно-техническим  
советом УО «ВГТУ», протокол № 3 от 11.05.2023.

Рекомендовано к изданию редакционно-издательским  
советом УО «ВГТУ», протокол № 1 от 25.09.2023.

**Беляков, Н. В.**

Б 43 Основы автоматизированного проектного базирования в субтрак-  
тивном и аддитивном машиностроительных производствах : моногра-  
фия / Н. В. Беляков, Н. Н. Попок ; УО «ВГТУ». – Витебск, 2023. – 183 с.  
ISBN 978-985-481-758-3

Изложены результаты исследований по развитию теории базирования. При-  
ведена классификация и понятийный аппарат базирования для решения задач авто-  
матизации проектирования. Описаны основы формализации и алгоритмизации про-  
цессов проектного базирования в субтрактивном и аддитивном машиностроитель-  
ных производствах. Освещены вопросы автоматизированного расчета параметров  
размерной настройки и оценки погрешности базирования.

Издание предназначено для инженерно-технических и научных работников  
машиностроительных предприятий, специалистов в области создания САПР, САМ-  
систем, программ для 3D-печати, аспирантов, магистрантов и студентов машино-  
строительных специальностей. Может использоваться также в системе повышения  
квалификации и переподготовки кадров машиностроительного профиля.

**УДК 658.512:004.896**  
**ББК 30.606.4**

**ISBN 978-985-481-758-3**

© УО «ВГТУ», 2023

# СОДЕРЖАНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ</b> .....	5
<b>1 РАЗВИТИЕ ОСНОВ ТЕХНОЛОГИИ МАШИНОСТРОЕНИЯ</b> .....	7
1.1. Анализ организационных форм субтрактивных и аддитивных производств .....	7
1.2 Генезис положений теории базирования .....	14
1.3 Подходы к понятию погрешности базирования и установки .....	23
1.4 Методы моделирования заготовок деталей в задаче автоматизации процессов базирования .....	24
1.5 Приоритетные направления исследований .....	34
<b>2 КЛАССИФИКАЦИЯ И ПОНЯТИЙНЫЙ АППАРАТ БАЗИРОВАНИЯ В ЗАДАЧАХ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ</b> .....	36
2.1 Классификация баз .....	36
2.2 Система терминов и определений .....	40
<b>3 МЕТОДИЧЕСКОЕ И АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПРОЦЕССОВ ПРОЕКТНОГО БАЗИРОВАНИЯ</b> .....	55
3.1 Модели заготовки и детали в задаче проектного базирования .....	55
3.1.1 Основы модульного представления объекта производства в задаче проектного базирования .....	55
3.1.2 Внутренние и внешние показатели функциональных модулей в задаче проектного базирования .....	58
3.1.3 Синтез модели объекта производства .....	63
3.2 Проектное базирование в субтрактивном производстве .....	64
3.2.1 Методическое и алгоритмическое обеспечение проектного базирования в субтрактивном производстве .....	64
3.2.2 Система поддержки принятия решений синтеза компоновок универсально-сборных станочных приспособлений ..	81
3.3 Проектное базирование в аддитивном производстве .....	87
3.3.1 Методическое и алгоритмическое обеспечение проектного базирования для аддитивного синтеза .....	87
3.3.2 Система поддержки принятия решений по базированию моделей деталей машин в рабочей зоне 3D-принтеров.....	100
<b>4 РАЗМЕРНАЯ НАСТРОЙКА И ПОГРЕШНОСТЬ БАЗИРОВАНИЯ</b> .....	103
4.1 Понятие статической и динамической размерной настройки .....	103
4.2 Размерная настройка при фрезеровании плоских поверх-	

ностей на станках с ЧПУ .....	111
4.2.1 Методическое и математическое обеспечение рас- чета параметров размерной настройки концевых фрез .....	111
4.2.2 Особенности моделирования параметров размерной настройки торцевых фрез .....	123
4.2.3 Система автоматизированного расчета параметров размерной настройки .....	127
4.3 Погрешность базирования и установки .....	129
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ</b> .....	144
<b>СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ</b> .....	147
<b>ПРИЛОЖЕНИЯ</b> .....	164
Приложение А. Таблицы однозначности задания ориентации поверхностей .....	164
Приложение Б. Правила назначения компонентов комплекта технологических баз .....	168
Приложение В. Обозначения установочных, установочно- зажимных и зажимных элементов .....	177
Приложение Г. Сокращения вариантов .....	181

## ВВЕДЕНИЕ

Развитие современного машиностроительного производства осуществляется в условиях эпохи четвертой индустриальной революции, характеризующейся V и VI технологическими укладами. Особенности этих технологических укладов являются расширение номенклатуры изделий и рост их степени сложности, глобальная автоматизация процессов проектирования и изготовления изделий, повышение гибкости субтрактивного и аддитивного производств, кастомизация выпускаемой продукции.

Обеспечить многообразие происходящих в машиностроении изменений и предпринимаемых действий невозможно без соответствующей методологии и теории конструкторской, технологической и организационной подготовки производства, совершенствования и применения прогрессивных методов обработки материалов и технологической оснастки.

Разработка методологии осуществляется в следующих основных направлениях:

- конвергенция знаний на основе НБИК-технологий, позволяющая учесть достижения в наноструктурах материалов, биологических, информационных и когнитивных сферах;

- расширение использования цифровых технологий, искусственного интеллекта и нейросетей, обеспечивающих удаленное управление процессами и повышающих быстродействие применяемых автоматизированных систем;

- систематизация процессов и объектов производства на основе статистических ограничений и выборки их размеров, сокращения объемов баз данных;

- моделирование и углубленное изучение физических и технологических процессов и создание новых теоретических положений и принципов развития производства.

Одной из нерешенных проблем технологии машиностроения, требующей применения современной методологии, является развитие (совершенствование) теории базирования обрабатываемых заготовок и моделирование технологических процессов изготовления нетиповых (оригинальных) деталей машин в многономенклатурном мелкосерийном субтрактивном и аддитивном производствах.

В связи с этим в данной работе поставлены и решены следующие задачи:

- анализ и научное обоснование основных положений, определений и понятий теории базирования в аддитивном и субтрактивном производствах;

– систематизация и создание принципов моделирования нетиповых деталей на основе модульной технологии для решения задач базирования в аддитивном и субтрактивном производствах;

– разработка методического и алгоритмического обеспечения проектного базирования в субтрактивном производстве, а также системы поддержки принятия решений синтеза компоновок универсально-сборных станочных приспособлений для нетиповых деталей;

– разработка методического и алгоритмического обеспечения проектного базирования в аддитивном производстве, а также системы поддержки принятия решений по базированию моделей деталей машин в рабочей зоне 3D-принтеров;

– разработка системы автоматизированного расчета параметров размерной настройки базирования фрез для программирования обработки плоских поверхностей деталей на станках с ЧПУ.

# 1 РАЗВИТИЕ ОСНОВ ТЕХНОЛОГИИ МАШИНОСТРОЕНИЯ

## 1.1 Анализ организационных форм субтрактивных и аддитивных производств

В машиностроительном производстве нашли широкое применение *единичная, типовая и групповая* формы организации субтрактивного производства и технологии [1].

*Единичный* технологический процесс строится для изделий одного наименования, типа, размера и исполнения. Он позволяет создать такие условия изготовления, контроля, перемещения, которые более всего соответствуют данному конкретному изделию. При этом каждый раз на основе опыта и знаний технологов синтезируется новый технологический процесс на каждую деталь. Трудоемкость технологической подготовки производства при этом очень высока, а процесс синтеза технологии неформализован. Поэтому традиционно такая технология используется для массового изготовления изделий.

*Типовая и групповая* технологии на основе субтрактивных методов обработки используются для изготовления несложных по конфигурации деталей класса тел вращения (типа «валы», «втулки», «шестерни» и т. п.). Для указанных конструктивно схожих деталей заранее определены базы на первой операции технологического процесса, порядок обработки и смены баз и, таким образом, формируется комплексный техпроцесс-аналог. Частные технологические процессы формируются на основе анализа (сравнения) конфигурации рассматриваемой детали с конфигурацией комплексной детали и техпроцесса-аналога.

Детали сложной формы, не относящиеся к классу тел вращения (типа «кронштейны», «стойки», «рычаги», «корпусы» и т. п.), чаще всего относят к числу оригинальных нетиповых. В общей номенклатуре деталей, применяемых в машиностроении, такие детали составляют порядка 15–20 %. Для оригинальных нетиповых деталей характерным и частым является задание допусков расположения элементов конструкции, а также высокая точность линейных размеров. В том случае, если заданная точность допусков расположения конструктивных элементов не обеспечена, то деталь неизбежно перейдет в неустранимый брак.

Анализ работы машиностроительных предприятий показывает, что типовой (групповой) техпроцесс для оригинальных нетиповых деталей составить невозможно, поэтому на них *синтезируются* индивидуальные технологические процессы.

В настоящее время развиваются подходы к технологической подготовке и организации машиностроительного производства на основе *модульной технологии* [2]. Модульная технология дает возможность

представления оригинальной нетиповой детали сложной формы в виде структурированной совокупности функционально-технологических элементов для решения задачи автоматизации синтеза индивидуальной единичной технологии. Что в свою очередь может на порядок уменьшить сроки технологической подготовки производства и создать условия для кастомизации продукции.

Перспективной является концепция *мобильного производства*, включающая основные принципы модульных и гибких технологий [3].

Мобильное производство – это производство изделий мелкими сериями большой номенклатуры с минимальными временными и финансовыми затратами. Степень мобильности производства  $Q_M$  определяется его возможностью реализовать данную степень сложности изделия или его способностью быстро и с минимальными затратами перестраиваться на выпуск новой продукции:

$$Q_M = f\left(\frac{\Delta Q}{\Delta \tau}, \Delta Z\right),$$

где  $f$  – значок функции;  $\Delta Q$  – отклонение степени сложности нового и базового вариантов производства;  $\Delta \tau$  – интервал времени, необходимый для реализации нового варианта производства;  $\Delta Z$  – величина дополнительных материальных затрат на реализацию нового варианта производства.

В свою очередь, степень сложности изделия включает конструктивную, технологическую и функциональную сложности, и представляется как показатель, имеющий, например, конструкторской сложности группу структурной сложности изделия и поправочные коэффициенты на его концептуальную сложность, новизну и т. д. Структурная сложность изделия  $Q_C$  определяется трудоемкостью его проектирования и рассчитывается по следующей формуле

$$Q_C = G_{cc} \cdot k_k \cdot k_m \cdot k_b \cdot k_3 \cdot k_T,$$

где  $G_{cc}$  – группа структурной сложности изделия;  $k_k$  – коэффициент концептуальной сложности изделия;  $k_m$  – коэффициент новизны решений;  $k_b$  – коэффициент изменения веса изделия;  $k_3$  – коэффициент изменения эксплуатационных характеристик изделия;  $k_T$  – коэффициент изменения габаритных размеров изделия.

Показатели и коэффициенты, входящие в данную формулу, определяются из нормативной литературы.

В основе построения технологических процессов в мобильном производстве находятся технологические модули, которые в отличие от модульных технологий являются, по сути, технологическими переходами по обработке конструктивных элементов и поверхностей деталей с учетом материалов заготовки и инструмента, режима резания и видов механической обработки. Имея базы данных технологических модулей, из них, как из «кирпичиков», может быть построен любой технологический процесс. Для реализаций мобильных технологий используется быстропереналаживаемая технологическая оснастка и металлорежущие станки с ЧПУ, что повышает гибкость производства. Автоматизированный выбор из баз данных необходимых технологических модулей позволяет сократить время на проектирование технологических процессов изготовления изделий, а использование быстропереналаживаемой технологической оснастки обеспечивает сокращение финансовых затрат на производство.

Задачи обеспечения точности допусков расположения конструктивных элементов должны решаться уже на стадии проектирования технологии и станочных приспособлений за счет рационального выбора баз. Базирование – это такой инструмент, который позволяет уже на стадии проектирования технологии обеспечить требуемые допуски расположения конструктивных элементов, равномерность снятия припуска с поверхностей, а также требуемые показатели точности чертежных размеров.

В технологических процессах современных субтрактивных машиностроительных производств широкое применение находят универсально-сборные приспособления (УСП). Сборка УСП для деталей оригинальных нетиповых деталей осуществляется слесарями-сборщиками высокой квалификации по чертежу детали, исходя из собственного опыта и интуиции. Как такового проектирования компоновочной схемы приспособления никем не производится. Как правило, вопросы обеспечения точности допусков расположения конструктивных элементов обрабатываемой детали не рассматриваются вовсе.

Анализ работ по автоматизации проектирования УСП показывает, что в проектной практике находят применение базы данных 3D-элементов УСП. Их стоимость составляет порядка 3-4 тысяч у. е. Однако каких-либо САПР УСП с инструментарием автоматического формирования компоновок приспособлений с учетом обеспечения требуемых допусков расположения конструктивных элементов в настоящее время нет [4–8].

Главной причиной отсутствия работоспособных систем автоматизации проектирования компоновок станочных приспособлений является несовершенство положений теории базирования, изложенной в ГОСТ 21495-77 «Базирование и базы в машиностроении. Термины и определения». В многочисленных работах отечественных и зарубежных

ученых, посвященных теории базирования в машиностроении, ведутся дискуссии [9–95].

Несмотря на то, что в современном машиностроении все большее применение находят *аддитивные технологии* такие, как: FDM – послойное наложение расплавляемых нитевидных полимеров; SLA – отверждение слоя фотополимера посредством лазерного луча; SLS, DMF, SLM – послойное лазерное спекание (плавление) порошковых материалов (полимеров или металлопорошковых композиций); DLP – засветка слоя фотополимера цифровым прожектором; Poly-Jet – отверждение слоя фотополимера ультрафиолетовой лампой; Ink-Jet – отверждение слоя порошкового материала путем нанесения связующего состава через многосопловую головку, вопросы базирования деталей в аддитивном производстве современными исследователями практически не рассматриваются.

Все перечисленные выше технологии аддитивного синтеза реализуются с помощью 3D-принтеров, основными узлами которых являются рамы, механизмы перемещения (двигатели и направляющие), слоеформирующие элементы (экструдеры, лазеры, головки, лампы, прожекторы), рабочие платформы, электроника [96–98].

На машиностроительных предприятиях 3D-принтеры применяются для: 1) прототипирования изделий (оценка эргономических качеств изделия; проверка собираемости и правильности компоновочных решений; гидроаэродинамические и другие испытания; предварительная проверка функциональности; дизайнерские модели с различными нюансами в конфигурации, цветовой гамме раскраски и т. д.); 2) литейного производства (создание литейных моделей, литейных форм и другой модельной оснастки); 3) производства деталей машин.

Важнейшим параметром качества деталей машин является точность размеров и допусков расположения поверхностей. В аддитивном производстве при 3D-печати точностные параметры деталей обуславливаются рядом факторов, таких как: 1) технология печати; 2) применяемый для печати материал; 3) толщина слоя печати (разрешение); 4) конструкция поддержек; 5) температурные деформации материала в процессе затвердения; 6) компоновочная схема принтера; 7) жесткость и точность изготовления деталей принтера; 8) качество сборки и калибровки принтера; 9) конструкция и точность механических передач и приводов (точность перемещения слоеформирующих элементов); 10) конструкция и ориентация направляющих; 11) ориентация модели детали при печати и др. [99–103].

Неперпендикулярность направляющих 3D-принтера оказывает особое влияние на взаимное расположение слоев при печати и, как следствие, на обеспечение точности допусков расположения поверхностей. Если допуски расположения не обеспечены, то деталь неизбежно перейдет в неустранимый брак.

Задача обеспечения перпендикулярности направляющих решается за счет: конструктивных особенностей рамы, направляющих, креплений узлов принтера; точности изготовления деталей; качества сборки принтера, а также его калибровки и юстировки. В последнее время распространение получают методики устранения влияния неперпендикулярности направляющих на точность печати на этапе юстировки программным способом. Для этого в «прошивку» принтера встраивается модуль (например, Bedskewcompensation для Marlin), который на основе ввода данных об измерениях диагоналей распечатанных прямоугольных образцов, расположенных в различных плоскостях, регулирует работу двигателей.

Однако опыт использования подобных модулей, а также анализ отзывов о результатах реализации указанной методики, показывает, что погрешность взаимного расположения поверхностей напечатанных деталей остается критичной для качества.

Обеспечение точности допусков расположения поверхностей деталей машин в аддитивном производстве должно осуществляться уже на этапе базирования (ориентации) модели детали в рабочей зоне принтера с помощью программ-слайсеров за счет правильного выбора баз с учетом геометрической точности принтера после процедур его сборки, настройки, калибровки и юстировки.

Для аддитивного синтеза детали на 3D-принтере по всем технологиям вначале с помощью CAD-системы формируется ее трехмерная модель. После этого модель преобразуется в формат, подходящий для печати (для большинства 3D-принтеров это формат STL). Далее с помощью программ-слайсеров (UltimakerCura, 3DPrinterOS, Astroprint, IceSL, ideaMaker, KISSlicer, MakerBotPrint, MatterControl, NetfabStandart, Octoprint, Repetier, SelfCAD, SlicerCrafter, TinkerineSuite, Simplify3D, Slic3r, Craftware и другие) модель разбивается на 2D-слои и формируют G-код [104–105].

Работа во всех слайсерах организована таким образом, что пользователю необходимо ввести информацию в ряде блоков настроек: 1) настройки программы (выбор языка, единиц измерения, расширенные функции, цветовое оформление, параметры отображения, информационные вкладки); 2) подключение принтера (выбор марки и модели, управление действиями экструдера, установка температуры и скорости, указание количества печатающих головок); 3) выбор филамента и вида материала; 4) работа с моделью (ориентирование, масштабирование, модификация, анализ); 5) параметры слайсинга (порядок разбиения на слои, поддержки, стенки и другие); 6) дополнительные установки (включение паузы для смены филамента, холостые передвижения и прочие).

В блоке «Работа с моделью» пользователю необходимо произвести ориентирование (базирование) модели детали в рабочей зоне прин-

тера (рис. 1). Эта процедура осуществляется пользователем на основе собственного опыта и интуиции. В литературных источниках лишь приводится ряд (иногда исключая друг друга) рекомендаций общего характера: расположение детали влияет на количество поддержек (расход материала и стоимость изделия); если габаритные размеры модели больше габаритных размеров рабочей зоны принтера по трем осям, то следует проверить возможность размещения модели в рабочей зоне по диагонали; цилиндры печатаются быстрее, если они расположены в рабочей зоне горизонтально; цилиндры печатаются качественнее, если они расположены в рабочей зоне вертикально; при ориентации следует учитывать условия работы детали при эксплуатации в связи с анизотропией напечатанной детали и др. [99–103].

В опубликованных работах также приводятся результаты экспериментальных исследований влияния параметров печати на точность изделий [101–103]. Для этого на конкретном 3D-принтере распечатывались опытные детали, производились исследования их точностных параметров и делались выводы о необходимости использования полученных данных для прогнозирования точности последующей печати.

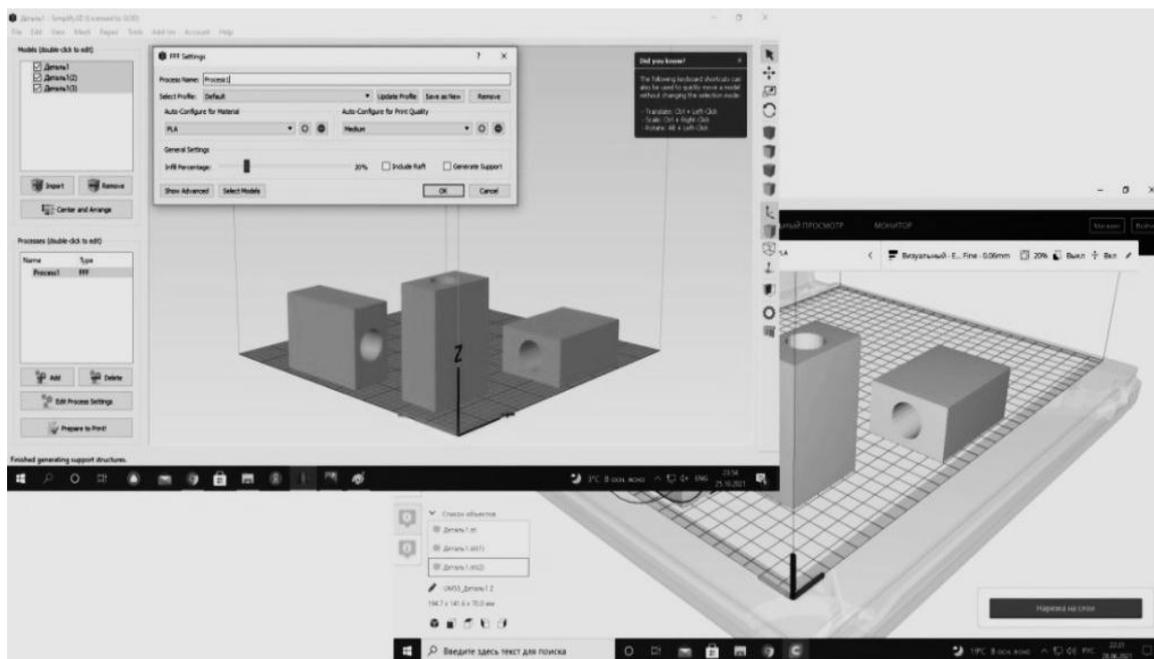


Рисунок 1 – Базирование детали в рабочей зоне 3D-принтера с помощью программ-слайсеров UltimakerCura и Simplify3D

Однако вопросы влияния различной ориентации детали в рабочей зоне 3D-принтера на обеспечение точности допусков расположения с учетом параметров геометрической точности принтера не рассматривались.

Для производства деталей машин в субтрактивном производстве широкое распространение получили металлорежущие станки с число-

вым программным управлением (ЧПУ), выполняющие токарные, шлифовальные, фрезерные и другие операции. Все большее распространение получают металлорежущие станки с ЧПУ нового поколения – обрабатывающие центры токарной и фрезерной групп, которые позволяют максимально концентрировать станочные работы.

При программировании станков с ЧПУ фрезерной группы важной задачей является *размерная настройка* (в частности определение положения систем координат заготовки и инструмента в начальной и конечной точках траекторий резания, а также величин врезания фрезы). От взаимного расположения указанных систем координат зависит основное (машинное) время и, как следствие, затраты на обработку. Во время врезания в заготовку фреза испытывает динамические ударные нагрузки, что существенно влияет на качество обработанной поверхности и эксплуатационные свойства инструмента. Поэтому производители инструментов в каталогах фрез и онлайн-калькуляторах режимов резания [106–108] рекомендуют их различные значения для врезания и устойчивого процесса резания.

Анализ литературных источников и опыт работы технологических бюро машиностроительных предприятий показывает, что программирование станков с ЧПУ осуществляется вручную (программа набирается на компьютере в текстовом редакторе и переносится на станок), на стойке с ЧПУ (ввод с клавиатуры) и с помощью САМ-систем (ComputerAidedManufactur). В проектной практике наибольшее распространение получили следующие САМ-системы: Компас ЧПУ, T-Flex ЧПУ, Прамень ЧПУ, MasterCAM, SiemensNX, NXCAM, EdgeCAM, SolidCAM, Creo, CATIA, PowerMill, InventorHSMExpress, Esprite, Xpress, HSMWorks, Radan, VisiSeries, CamWorks и др.

Эти системы работают с трехмерными моделями деталей, разработанными в соответствующих графических редакторах. При разработке управляющих программ для торцового фрезерования плоских поверхностей после ввода исходных данных (конструктивные элементы, инструменты и другие) системы, как правило, либо предлагают пользователю в графическом или(и) диалоговом режиме определить начальное и конечное положение фрезы с возможностью проверки аварийных ситуаций, либо выставляют ось вращения фрезы в начало конструктивного элемента (рис. 2) [106–110]. При использовании стандартных циклов (CYCLE71, CYCLE72 и т. д.) также не учитываются геометрические параметры пластин, пользователи сами задают начальные и конечные положение фрезы и величины врезания.

Таким образом, указанные системы и известные методики программирования не позволяют в автоматическом режиме определять рациональные положения систем координат заготовки и инструмента в начальной и конечной точках траекторий резания для обеспечения минимальных рабочих ходов с учетом форм современных твердосплавных

пластин, а также величины врезания фрез. Не дают такой возможности и онлайн-калькуляторы режимов резания. В справочной и учебной литературе [114–116] лишь приводятся рекомендации по определению основного времени для некоторых вариантов врезания фрез.

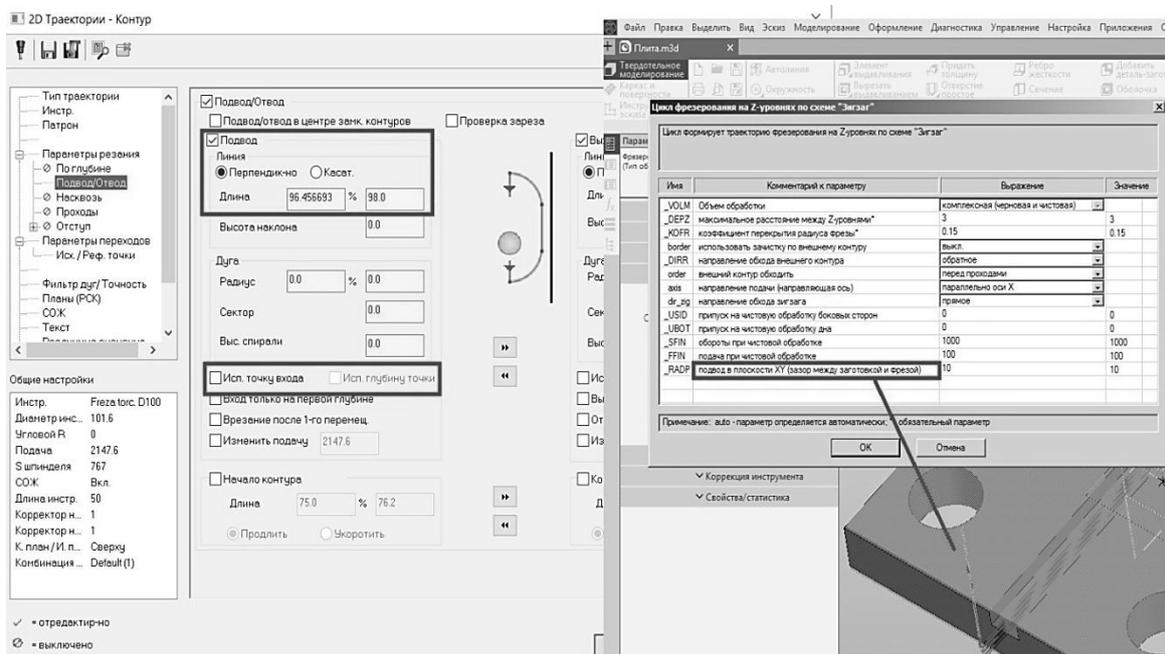


Рисунок 2 – Интерфейсы задания начального и конечного координат фрезы в MasterCAM и Компас ЧПУ

Для решения задачи автоматизации проектного базирования и размерной настройки необходимо осуществить переход от вербальной модели, через графическую (чертеж), символическую и логическую модели к базе данных. При этом важное значение имеет преобразование конструкторской информации в форму, удобную для ее обработки и принятия решений [117–183].

Таким образом, для реализации концепции «Индустрии 4.0» для оригинальных нетиповых изделий сложной формы необходимо создать научно-методические основы моделирования и базирования указанных изделий для модульных технологий в многономенклатурном аддитивном и субтрактивном машиностроительном производстве.

## 1.2 Генезис положений теории базирования

На протяжении всего периода становления технологии машиностроения теорией базирования занимались многие исследователи. Анализ работ [9–95] авторов в различные хронологические периоды показывает, что в своем развитии теория базирования прошла три этапа.

На *первом этапе* (до 1970-х годов) не наблюдался единый подход к классификации баз и формированию основных понятий и определений теории. На этом этапе в работах К.М. Гладкова, Д.П. Маслова, Е.И. Глущенко, А.М. Каратыгина, Е.Г. Анненкова и других приводятся различные несистематизированные обозначения установочных элементов, баз, базовых поверхностей, по разному интерпретируется само представление о базировании.

Выбор комплекта технологических баз рекомендовалось осуществлять на основе рекомендаций общего характера, пригодных для некоторых типов деталей (М.О. Якобсон, А.В. Эттель, Б.Л. Беспалов, Л.А. Глейзер и др.) [9–19].

К 1976 году под руководством Б.С. Балакшина была разработана иерархическая классификация основных понятий и определений теории базирования, отраженная в ГОСТ 21495-77 «Базирование и базы в машиностроении. Термины и определения» (далее ГОСТ). Последователи и ученики Б.С. Балакшина (Л.Н. Воробьев, А.А. Гусев, Ю.М. Соломенцев, И.М. Колесов и другие) в своих исследованиях часто использовали и используют основные положения ГОСТа [20–37].

Несмотря на многочисленные работы отечественных и зарубежных ученых, посвященные теории базирования в машиностроении, и введение ГОСТа, на *третьем* современном этапе по теории базирования на страницах ведущих машиностроительных изданий ведутся оживленные дискуссии.

Так в работах [38, 39] говорится о том, что в зависимости от технологической задачи, решаемой при обработке заготовки, при ее базировании в приспособлении или на станке могут быть использованы одна, две или три базы, несущие на себе в общей сложности три, четыре, пять или шесть опорных точек. Это же утверждение поддерживается и в работе [40]. Введено понятие настроечной базы, под которой понимается поверхность заготовки, по отношению к которой ориентируются обрабатываемые поверхности, связанная с этими поверхностями непосредственными размерами и образуемая при одном установе с рассматриваемыми обрабатываемыми поверхностями заготовки (на рисунке 3 а – это поверхность  $A$  для поверхности  $A_1$ , на рисунке 3 б – поверхность  $B$  для поверхностей  $C, D, E$ ).

В работах [41, 42] утверждается, что схема базирования является одним из разделов задания для проектирования приспособления, а также, что схеме базирования может соответствовать несколько схем установки. Приводится классификация базовых поверхностей, согласно которой все базовые поверхности разделены всего на четыре вида: установочная база лишает деталь трех степеней свободы; направляющая база – двух; опорная – одной (линейного перемещения); вспомогательно-опорная – одной (вращения). Перечислено 10 видов поверхностей, которые могут выполнять функции базирования: наружные и внутренние

цилиндрические, наружные и внутренние конические поверхности, плоскости, линейчатые, сферические, шлицевые и зубчатые, резьбовые наружные и внутренние поверхности.

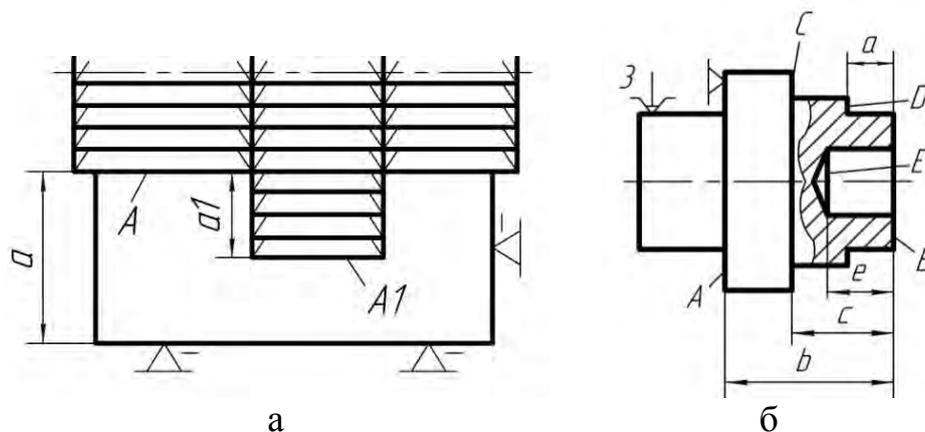


Рисунок 3 – Примеры настроечных баз:

а – обработка заготовки набором фрез; б – обработка тела вращения

Утверждается то, что в общем случае для полной и однозначной ориентации оснащаемого объекта в пространстве (т. е. для лишения его всех шести степеней свободы) требуется присутствие в схеме базирования одного, двух или трех «функциональных видов» базовых поверхностей: установочных, направляющих и опорных баз. Приводится формула для подсчета максимального числа теоретически возможных «схем базирования» (сумма всевозможных сочетаний из десяти элементов по 1,2,3). Под «схемой базирования» понимается сочетание поверхностей, например: два цилиндрических отверстия и плоскость, наружная цилиндрическая поверхность и плоскость и т. д. Какие-либо алгоритмы проектирования схем базирования не приводятся. Не показано ни одной «схемы» базирования или установки.

В работе [43] также предлагается использовать понятия проверочной и настроечной баз. Описывается базирование «длинных» и «коротких» цилиндрических, конических, сферических и фасонных тел. Полагается, что в основу выбора баз должны быть положены принципы единства и постоянства баз. Устанавливается порядок приоритета конструктивных элементов: призматические, цилиндрические, конические, фасонные. Утверждается, что в зависимости от решаемой задачи базирование может быть полным (6 связей) и частичным (меньше 6). Определены критерии определения баз. Так установочной базой, независимо от простановки размеров и допусков расположения, назначается наиболее развитая по площади поверхность, обеспечивающая наилучшую устойчивость.

В работе [44] отмечается то, что количество опорных точек (точек соприкосновения с установочными компонентами) на схеме базирова-

ния может быть и больше, и меньше шести. Приводятся примеры «схем базирования» с тремя, семью и даже девятью опорными точками (рис. 4). По сути, автор этой работы понятия реального базирования (когда на количество реальных точек сопряжения влияют погрешности технологических баз и установочных элементов) смешал с проектированием схемы базирования (когда рассматривается деталь с некоторыми допускаемыми упрощениями).

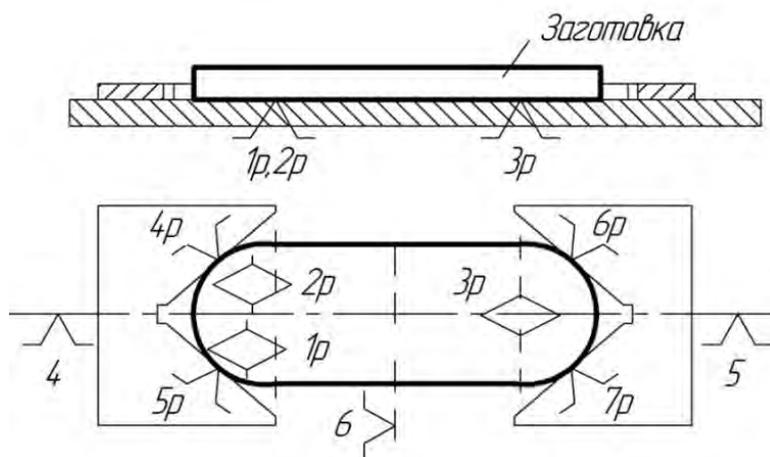


Рисунок 4 – Схема базирования по Б.Н. Байору

В работе [45] поддерживается идея о разграничении понятий реального и проектного базирования, но в ней не определена цель разработки теоретической схемы базирования и отсутствует понятие теоретической схемы установки. В связи с этим у автора на одной и той же схеме при помощи значков указывается базовая система координат (причем неясно, из каких соображений она строится) и конструктивные элементы приспособления (рис. 5).

В работах [46–48] вообще отсутствуют значки баз, а приводятся либо схемы установки некоторых классов деталей, либо конструктивное оформление приспособления, называемое «схемой базирования» [48].

В работе [49] приводятся классификация схем базирования «с замыканием по силе и по моменту». Осеопорная база с замыканием по моменту имеет вид, приведенный на рисунке 6, однако какого-либо обоснования такой классификации с точки зрения реального использования не приводится.

Особенно жесткой критике подвергся ГОСТ в многочисленных работах Ф.Н. Абрамова [50–63]. Предлагается новая терминология базирования. Так, вводится понятие «реальной схемы базирования» (причем в различных работах эти схемы имеют совершенно различное смысловое значение и графическое изображение) [52, 59], «переменно-координатной базы», «отсчетной базы» и др. Но и в предлагаемых им новых терминах не учитывается, что понятие «базирование» использу-

ется в двух совершенно различных ситуациях. К первой относится *решение задач эксплуатации* специальной, специализированной и универсальной оснастки для изготовления деталей, для сборки машин и для контроля. Ко второй – *решение задач проектирования* указанной оснастки. В первой ситуации рассматривается пространственное взаимодействие *реальных объектов*, а во второй – их *моделей*. И самое главное, в работах не приводится каких-либо алгоритмов проектирования.

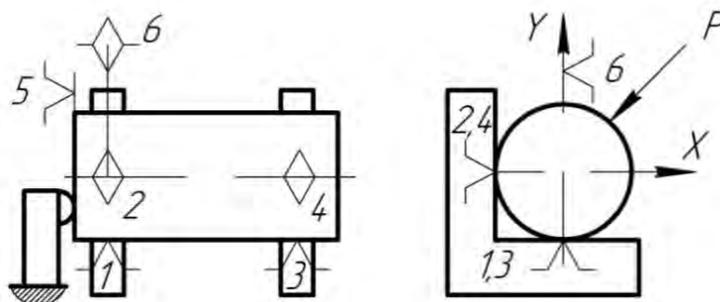


Рисунок 5 – Схема базирования по В.Н. Емельянову

Кроме того, особо следует отметить, что если на схеме базирования не указываются выдерживаемые размеры [44–63], то процесс ее разработки вовсе теряет всякий смысл.

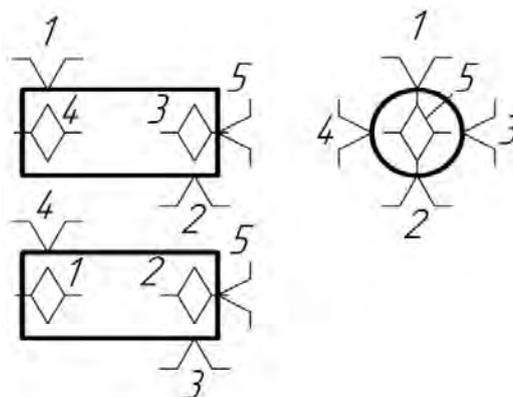


Рисунок 6 – Осеопорная база

В работе [64] высказывается идея о том, что в некоторых случаях механической обработки функцию базирующей подсистемы полностью или частично может выполнять инструмент. Идея о материализации баз на инструменте является основой для определения критерия сложности базирующей подсистемы: чем больше баз, не имеющих структурных связей с инструментом, тем базирующая подсистема сложнее.

В работе [65] теория базирования рассматривается с системных позиций. В виде тезисов утверждается то, что использование теории базирования затруднено из-за отсутствия разграничения реального про-

цесса установки и его проектной модели. В работе рассматривается проектное базирование для механической обработки деталей любых классов, которое сводится к «размещению шести «реперных» точек базовой системы координат на номинальных поверхностях геометрической модели заготовки». Под номинальными понимаются идеализированные поверхности, от которых принято откладывать размеры и допустимые отклонения. Однако до каких элементов их принято откладывать – не говорится, как следствие, неясно, как определить эти номинальные поверхности, каков их состав, что такое геометрическая модель заготовки. Отсутствует классификация баз (по видам, числу налагаемых связей и др.). Расположение «реперных» точек в базовой системе координат сводится всего к двум вариантам. Уточнения понятий схемы базирования и схемы установки крайне неудачны. Так, под схемой базирования понимается «результат выполнения проектного базирования и выявление номинальных поверхностей, получаемых на текущей операции, с указанием всех необходимых показателей геометрической модели заготовки». Очевидно, «схема» не может быть процессом «выявление». Неясно, что подразумевается под необходимыми показателями геометрической модели. Не излагаются цели и задачи базирования, не приводится каких-либо примеров. Предлагаемые в работе понятия не позволили предложить каких-либо правил, алгоритмов проектирования схем базирования, установки, порядка смены баз, заданий на проектирование приспособлений. В конечном итоге положений, разграничивающих реальное и проектное базирование, не приводится.

Целью работы [66] является построение более четких формулировок, устранение неоднозначности толкования и некоторых несоответствий в определениях ГОСТа. Рассматриваются предложения по формулировке понятий некоторых других авторов. Предлагается ряд формулировок понятий «база», «базирование» и др. При этом, в чем заключается преимущество предложенных формулировок, не уточняется.

В работе [67] предложено изменение изображения опорной точки с классического на символ в виде трехмерного тела – сочетание конуса с цилиндром (рис.7). Преимуществами такого обозначения, по мнению авторов, является то, что оно отвечает требованиям машиностроительной графики, не возникает проблемы распознавания и места их расположения, позволяет по-иному взглянуть и на принцип базирования.

В работе [68] предложена идея о геометрическом, динамическом и квазидинамическом подходах к базированию. При статическом подходе рассматривают статическое состояние детали. При динамическом подходе учитывают то, что на процессы базирования влияют: погрешность формы поверхности, силы трения, характер приложения сил и моментов, скорости и ускорения детали при ее перемещении в рабочую зону.

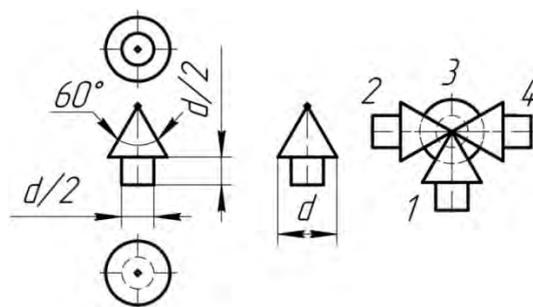


Рисунок 7 – Рекомендованный объемный графический символ опорной точки

Авторы работы [69] выступают в роли «защитников» ГОСТа. Утверждается, что стандарт в сочетании с несколькими дополнительными терминами (например «эскизная база») позволяет логически непротиворечиво излагать теорию и решать практические задачи базирования заготовок и изделий только при обработке и контроле. Вместе с тем утверждается, что использование конструкторской базы в качестве технологической (принцип единства баз) не является догмой. В статье говорится, что на практике технолог, разрабатывая процесс изготовления детали, может по соображениям секретности не иметь доступа к чертежам и не представлять какие поверхности являются конструкторскими базами.

В работе [70] приводится классификация скрытых баз, согласно которой скрытые базы делятся на поверхности, линии и точки. Также в работе приводятся варианты реализации скрытых баз.

В работе [71] рассматриваются вопросы вариантного проектирования на ранних этапах формирования схем базирования и комплектов баз для базирования формообразующих звеньев металлорежущих станков и определения опорных точек. Сочетанием различных баз сформированы варианты комплекта баз как для неподвижных, так подвижных звеньев формообразующей системы станка. Приведен пример лишения подвижного звена пяти связей.

В работе [72] введено новое понятие – искусственная база. Под искусственной базой понимается специально созданная база на детали – поверхность, которая после обработки поверхностей детали, как правило, удаляется (приливы, центровые отверстия и др.).

В работе [32] наряду с цитированием положений ГОСТа приводится следующий алгоритм назначения баз: установить геометрические элементы заготовки, которые могут служить базами (на элементы, которые предпочтительнее использовать в качестве базовых, как правило, указывает простановка размеров на чертеже детали); выявить функции каждого геометрического элемента, выбранного в качестве базы и расставить опорные точки (при выявлении функции поверхностей необходимо учитывать, во-первых, характер точностных требований, во-

вторых, геометрические параметры каждой базы); построить на выбранных базах систему координат, жестко связанную с заготовкой.

Теория базирования также подвергается критике и находит свое развитие в работах Базрова Б.М., Хейфеца М.Л., Родионовой Н.А. [73–79] В работе [73] проводится грань между базирующим элементом и конструкцией из базирующих элементов. Выделяют две группы базирующих элементов: опорные и опорно-зажимные. Приведены факторы, влияющие на выбор конструкции базирующего элемента (число степеней свободы, вид базы заготовки, геометрия, размеры и качество поверхностей). Рассмотрено влияние перечисленных факторов на требования к конструкции базирующих элементов. Приведен классификатор базирующих элементов в зависимости от данных параметров, с целью дальнейшего их кодирования (рис. 8).

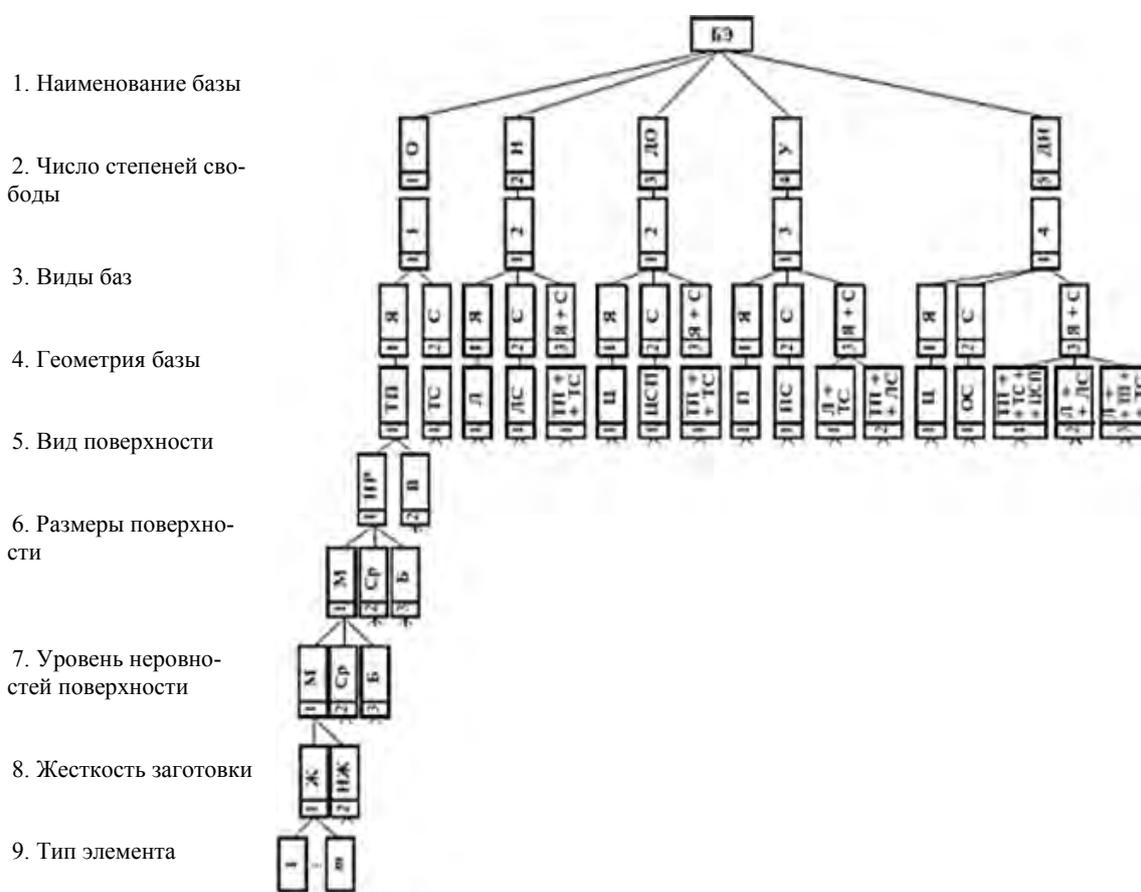


Рисунок 8 – Классификатор базирующих элементов

В работах [74,77,78] было выдвинуто предложение рассматривать деталь, как совокупность групп функционально связанных поверхностей, в качестве которых создаются модули поверхностей МП – сочетание поверхностей, предназначенное выполнять соответствующую служебную функцию детали и придавать детали конструктивную форму, обусловленную требованиями эксплуатации и изготовления. Включение

в рассмотрение явных и скрытых баз потребовало введения понятия «модуль баз» (МБ), под которым понимается совокупность явных или скрытых баз, образующих комплект баз. Было рассмотрено влияние частичного и полного несовпадения баз на образование операционных координирующих размеров и их погрешностей. Предлагаются новые обозначения баз на схемах.

В работах [75, 76] под схемой базирования понимается распределение координат трех точек по координатным плоскостям по схеме 3 – 2 – 1. Двойная опорная база может лишать заготовку двух поворотов или одного перемещения и одного поворота. Приводятся новые обозначения опорных точек. Утверждается, что всего возможно 6 вариантов комплектов баз. Предлагаемые изменения, по мнению автора, «позволяют снять многие вопросы, возникающие при решении задач базирования». Однако какие именно вопросы, и каким образом снимают – не ясно.

В работе [79] впервые предлагается совершенствовании теории базирования с учетом аддитивных технологий. Приводится идея о делении баз на «материальные» и «нематериальные». Утверждается, что опорная точка должна по аналогии с механикой показывать лишение предмета одной степени свободы, т. е. перемещения по одной координате. Приводится обозначение опорной точки (рис. 9). Вводится понятие тройной опорной базы.

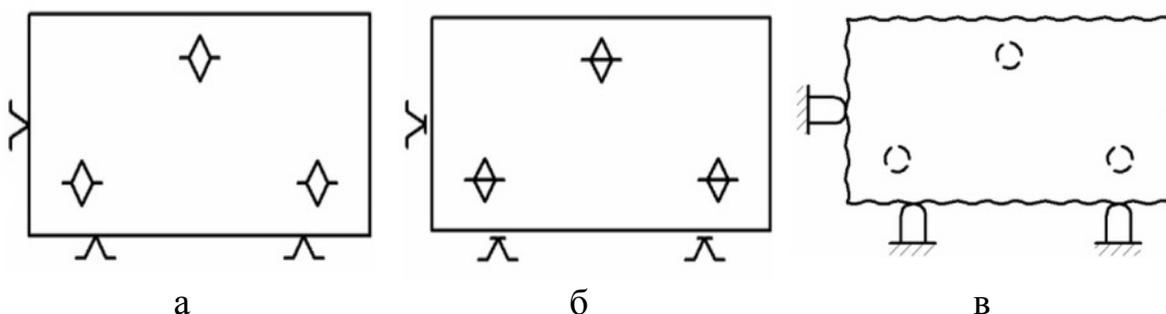


Рисунок 9 – Обозначение схемы базирования:  
а – стандартное, б – предложенная проектная схема,  
в – конструкторская схема

Однако в этих работах нет разграничения понятия реального и проектного базирования, не определена цель проектного базирования и, как следствие, не предложено каких-либо правил, алгоритмов проектирования схем базирования, установки, порядка смены баз, заданий на проектирование приспособлений. Неясно, какой практический эффект могут дать предложенные определения.

### 1.3 Подходы к понятию погрешности базирования и установки

Одним из ключевых понятий теории является понятие погрешности базирования и погрешности установки. Под погрешностью базирования согласно ГОСТу понимается отклонение фактически достигнутого положения заготовки или изделия при базировании от заданного, а под погрешностью установки – отклонение фактически достигнутого положения заготовки или изделия при установке от требуемого. Под установкой понимается процесс базирования и закрепления заготовки.

Однако в работах [80, 81] под погрешностью установки понимается неточность положения заготовки, режущего инструмента, приспособления и другого относительно баз станка. За базы станка принимают вспомогательные базы (как правило, направляющие), по которым перемещаются сборочные единицы, несущие исполнительные поверхности. Базы станка называются базами установки.

Эта идея поддерживается в работах [82, 83]. Здесь же приводится методика расчета погрешности базирования, под которой понимается несовпадение измерительных и технологических баз, с помощью матриц влияния.

В работе [65] под погрешностью схемы базирования понимается «мера несовпадения базовой системы координат с номинальными поверхностями геометрической модели заготовки, от которых заданы размеры, получаемые на текущей операции». Погрешность схемы установки – «мера несовпадения базовой и опорной систем координат». Утверждается, что расчет погрешности схемы установки аналогичен расчету погрешности схемы базирования и производится по известным (неясно каким) правилам. Дополнительно введено понятие «погрешность установки».

В работах Абрамова Ф.Н. [52–63] под погрешностью базирования понимается отклонение отсчетной базы для выполняемого при базировании заготовки или изделия конструкторского параметра от требуемого (постоянного) положения в выбранной системе координат. Величина погрешности базирования равна полю рассеяния отклонений отсчетной базы для выполняемого конструкторского параметра относительно требуемого (постоянного) положения в выбранной системе координат, рассчитанному в направлении этого параметра в пределах нормируемого участка. Предложен критерий количественной оценки погрешностей базирования, возникающих из-за воздействия различных факторов. Факторами, влияющими на погрешность базирования, являются: погрешность формы поверхности, форма и размеры контактных поверхностей опор и контактирующих поясков пальцев, схема расположения опор на

установочной базе, место расположения поясков пальцев по высоте нормируемых участков и др.

В работе [84] представлены результаты аналитических и экспериментальных исследований точности базирования ступенчатых валов в переналаживаемых призмах на сверлильных и фрезерных станках. Обоснована целесообразность применения переналаживаемой призмы в комплекте УСП.

В работе [85] установлено, что при измерении детали методом фотометрии возникает погрешность базирования эталонного объекта или детали в виде непараллельности их поверхностей и базовой плоскости фотоаппарата.

В работе [86] рассматриваются погрешности базирования при координатных измерениях цилиндрических зубчатых колес. Описаны этапы измерения.

В работах [87–90] впервые предложено разграничение понятий реального и проектного базирования, теоретической схемы базирования и установки при конструировании, механической обработке и сборке. Цель базирования в инструмент формализации проектирования технологических процессов механической обработки и станочной оснастки в машиностроении. Введена классификация баз по назначению: конструкторские и технологические, которые в свою очередь делятся на базы механической обработки, сборочные и измерительные. Описан комплект баз ориентации и задания взаимного расположения элементов конструкции на чертежах и операционных эскизах. Рассмотрены варианты расположения точек сопряжения и число связей технологических баз. Приведен алгоритм синтеза схем базирования и установки заготовок, так же введены утверждения для определения функций компонентов комплекта технологических баз ориентации. Однако в этих работах учтены не все аспекты базирования в машиностроении. Процедуры выдачи задания на проектирование приспособления являются недостаточно формализованными. Вопросы базирования при аддитивном синтезе не рассматривались вовсе.

#### **1.4 Методы моделирования заготовок деталей в задаче автоматизации процессов базирования**

Организация производства по *типовой и групповой* технологиям на основе субтрактивных методов обработки используется для изготовления несложных по конфигурации деталей класса тел вращения (типа «валы», «втулки», «шестерни» и т. п.). Методы представления информации в *типовой и групповой* технологиях впервые разработаны А.П. Соколовским [117, 118] и С.П. Митрофановым [119–122].

Типовое и групповое проектирование основано на принципах технологической унификации и разработке классификаторов типовых деталей и техпроцессов-аналогов. Для указанных конструктивно схожих деталей заранее определены базы на первой операции технологического процесса, порядок обработки и смены баз и, таким образом, формируется комплексный техпроцесс-аналог. Частные технологические процессы формируются на основе анализа (сравнения) конфигурации рассматриваемой детали с конфигурацией комплексной детали и техпроцесса-аналога.

Проектирование типовых и групповых технологических процессов способствует сокращению сроков и стоимости технологической подготовки производства. Типовые и групповые методы заложены в основу ЕСТПП и в значительной мере способствуют созданию систем автоматизированного проектирования (САПР) технологических процессов в машиностроении.

На основе обобщения методов обработки типовых поверхностей корпусных деталей в ЭНИМСе в 1970–80 гг. разрабатывались типовые компоновки агрегатных станков, типовые технологические циклы и модели обработки поверхностей на станках с ЧПУ; проводились работы по построению маршрутного технологического процесса обработки, выбору режущего инструмента, методам и средствам установки деталей на автоматизированных станочных комплексах [123–126].

Были разработаны технологические регламенты обработки ряда сложных деталей [127–130], однако вопросы синтеза индивидуальных технологических процессов, схем базирования и установки не рассматривались.

Как было отмечено выше, детали сложной формы, не относящиеся к классу тел вращения, чаще всего относят к числу оригинальных нетиповых. Как правило, для таких деталей характерным и частым является задание допусков расположения элементов конструкции, а также высокая точность линейных размеров. В том случае, если заданная точность допусков расположения конструктивных элементов не обеспечена, то деталь неизбежно перейдет в неустранимый брак. Задачи обеспечения точности допусков расположения конструктивных элементов должны решаться уже на стадии проектирования технологии при определении комплектов технологических и измерительных баз и числа связей. Комплексный техпроцесс для указанных деталей составить невозможно, поэтому на них *синтезируются единичные* технологические процессы.

Для решения различных задач *синтеза единичной технологии* в проектной практике находят применение различные способы разбиения детали на типовые компоненты (линии, поверхности, симплексы, шестимерные векторы, функциональные модули, элементы конструкции и т. п.), которые далее объединяются в однородные группы. После чего

определяются линейные и угловые размеры между ними и их точность, а также показатели качества поверхностей [131–159].

В работах [148–152] впервые рассматриваются вопросы синтеза единичных технологических процессов на основе многошагового итерационного поиска преимущественно для деталей типа вал и втулка. Предлагаются классификаторы элементарных поверхностей, согласно которым все поверхности делятся на классы, подклассы, группы, виды и типы по кинематическому признаку.

В работах [160, 161] впервые предложен формализованный метод проектирования схем базирования заготовок и порядок обработки поверхностей полностью соответствующий концепции синтеза индивидуальных технологических процессов, основой которого является представление конструкторской информации с помощью матричных форм. Главный постулат методики основан на том, что положение любой поверхности в системе координат можно задать шестимерным вектором, каждый элемент которой характеризует линейную ( $x_i, y_i, z_i$ ) или угловую ( $x_\alpha, y_\alpha, z_\alpha$ ) связь поверхности с рассматриваемой системой координат. Для отображения этих связей строят шестиклеточные таблицы, в которых проставляют булевы переменные (1 – связь существует, 0 – связь отсутствует) (рис. 10). Для детали связь поверхностей с системой координат представляется некоторым комплектом шестиклеточных таблиц, отображающих требуемое положение поверхностей.

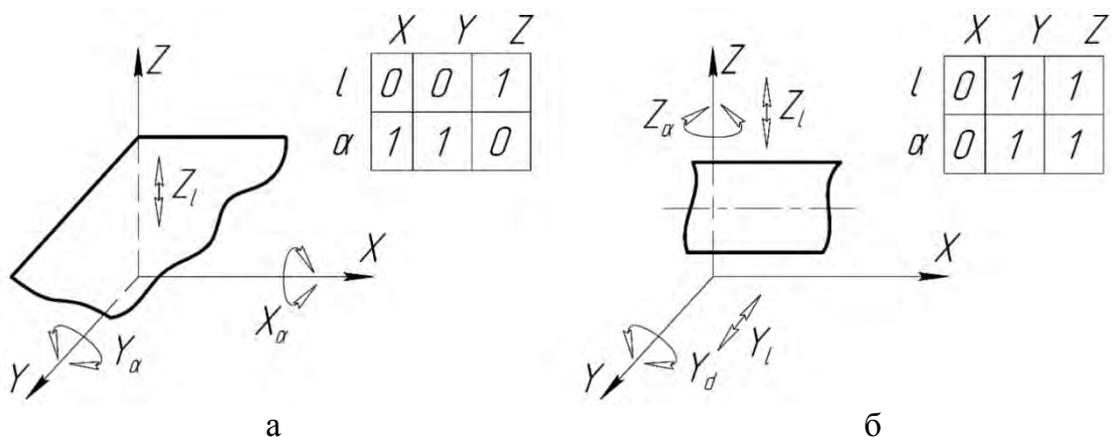


Рисунок 10 – Шестиклеточные таблицы связей:

а – определение плоскости в системе координат, б – определение цилиндрической поверхности в системе координат

Поверхности детали связаны не только с системой координат, но и между собой. Физический смысл этих связей, по мнению автора, заключается во взаимной ориентации поверхностей. Утверждается, что если одну из поверхностей определенным образом ориентировать в системе координат, то и другая поверхность будет ориентирована, но ее положение может быть определено не полностью. Таким образом, для полной

ориентации второй поверхности связей первой поверхности с системой координат недостаточно. «Привязка» второй поверхности к системе координат осуществляется как бы косвенно через первую поверхность, которая является базой.

Для «формальной интерпретации» геометрической информации о детали строится матрица геометрического образа. Элементами матрицы являются шестиклеточные таблицы, характеризующие пространственную связь между базами ориентируемыми поверхностями. Они получены путем логического поэлементного перемножения (конъюнкции) шестиклеточных таблиц, находящихся в шапке и боковой стороне матрицы и отображающих положение тех и других поверхностей в системе координат.

Утверждается, что матрица *«формально интерпретирует» геометрию детали в пространстве* и позволяет определить возможные пути перехода от поверхности к поверхности.

Каждая из поверхностей матрицы геометрического образа, с одной стороны, требует определенной ориентации (шестиклеточные таблицы, находящиеся в шапке матрицы), с другой – может являться базой, ориентируя деталь определенным образом (шестиклеточные таблицы, находящиеся в боковине матрицы). Механизм образования и сущность элементов матрицы поясняется следующим образом. Если поверхность, указанную в начале строки, использовать в качестве базы, то поверхности, указанные во втором и последующих столбцах, будут лишены некоторых степеней свободы в соответствии с элементом шестиклеточной таблицы.

Если на матрицу, отражающую конструкторский образ детали, наложить комплекс технологических ограничений (возможность использования поверхности детали в качестве базы, наличие и возможности изготовления оснастки, технологические возможности оборудования), то будет получена технологическая матрица. Технологическая матрица будет отражать конструкцию детали в реальных производственных условиях, и она обеспечит возможность выбора технологических баз, формирование комплексов поверхностей, что, в свою очередь, позволяет решать задачи синтеза последовательности обработки и формирования технологических операций.

Однако методика, изложенная в работах [160, 161], пригодна только для случая, когда анализируемые поверхности детали параллельны или перпендикулярны. Кроме того, в них не предложен алгоритм выбора числа связей, которые накладывает выбранная база, а выбор наилучшего комплекта баз из довольно мощного множества предлагается проводить в режиме диалога с ЭВМ. В работах не учитываются размерные связи между поверхностями.

В работе [162] приводятся концептуальные положения индивидуального проектирования технологических процессов механической об-

работки заготовок вне зависимости от класса детали. Проектирование технологического процесса делится на шесть стадий. На первой стадии из технологических модулей отбирается информация о переходах, переходы распределяются по этапам. На второй – «отбираются» схемы установки. Для этого подбираются «оптимальные комплекты баз» (погрешность базирования равна нулю). На третьей стадии осуществляется объединение элементарных переходов в инструментальные. На четвертой стадии осуществляется выбор технологического оборудования. Для этого инструментальные переходы сопоставляются с технологическими возможностями станков. Формируется таблица выбора оборудования. На пятой – осуществляется распределение переходов по операциям. На шестой стадии формируется список режущего инструмента. Однако в работе не учитывается то обстоятельство, что принципиальное значение для проектирования технологии имеет класс детали. Не приводится описания формирования модели заготовки на этапах для выбора баз. Не разработанными остались вопросы определения комплектов баз для оригинальных нетиповых деталей на первой и последующих операциях, порядка обработки, порядка смены баз, определения числа налагаемых связей, выдачи задания на проектирование приспособления. Стадия выбора оборудования не учитывает поверхности базирования, возможность совмещения переходов в зависимости от комплектов баз. Выбор режущего инструмента предлагается осуществлять на завершающей стадии, хотя уже на первой стадии его можно предопределить в технологическом маршруте обработки, а далее на четвертой стадии выбрать окончательно. Не приводится каких-либо примеров или моделей. Предложенная концепция была развита авторами настоящей монографии и может быть усовершенствована и развита применительно к оригинальным нетиповым деталям.

В работе [163] описаны методики представления детали и определения оптимальной структуры ТП на основе расчета количества составляющих звеньев в уравнениях размерных цепей и *определения положения узлов (баз)* на нормальных, ускоренных и замедленных графах и обеспечивающие минимальное суммарное колебание припусков. Однако в работе не учитывается то обстоятельство, что размерная структура технологического процесса, обеспечивающего минимальное суммарное колебание припусков, далеко не всегда обеспечивает выполнение заданных конструктором чертежных размеров. Несоблюдение этого условия приводит к увеличению себестоимости обработки за счет неизбежного выхода детали в брак. Кроме того, в работе ничего не говорится об обеспечении допусков расположения, заданных на чертеже.

Основой методики автоматизированного проектирования ТП механической обработки, представленной в работе [164], является решение задачи с определением координации поверхностей детали. Основной принцип решения задачи – принцип «наикратчайшего пути», вве-

денный Балакшиным Б.С. В качестве исходных данных для определения последовательности координации поверхностей используют неориентированные графы типа «дерево», содержащие описание отношения связности по размеру между элементами чертежа. Задача определения последовательности координации поверхностей сводится к преобразованию неориентированного графа в направленный граф, с помощью определения корня дерева и процедуры упорядочения и ориентации вершин. Приводится алгоритм определения ориентации корня дерева. Определив корень дерева с помощью расчета степени каждой вершины графов, можно идентифицировать базу для обработки большинства поверхностей, а определив ориентацию графа с помощью понятия «полустепень» для каждого элемента чертежа, идентифицируют элемент, задающий его положение. Согласно алгоритму необходимо определить связанные группы поверхностей. Из ориентированного несвязного графа строится ориентированный связный граф, с помощью которого можно определить (если полустепень захода равна трем) для обрабатываемых поверхностей различные схемы координации (три взаимно перпендикулярные плоскости; плоскость и две параллельные поверхности вращения, перпендикулярные этой плоскости; взаимно перпендикулярные плоскость и поверхность вращения и плоскость, перпендикулярная к плоскости; три взаимно перпендикулярных поверхности вращения). Если полустепень захода вершины меньше трех, то исследуют вершины смежные с рассматриваемой. Для обработки в одной операции объединяют те поверхности, которые эквивалентны одной и той же базовой поверхности. Однако в работе не учтено то обстоятельство, что при проектировании технологического процесса необходимо в первую очередь обеспечить заданные чертежом требования взаимного расположения поверхностей (перпендикулярность, угловое расположение), а затем только линейные размеры. Также не приводится алгоритм назначения числа связей, накладываемых базовыми поверхностями, отсутствуют формальные правила назначения баз внутри этапов типовой схемы механической обработки.

Проблеме моделирования процесса выбора баз при машинном проектировании технологических процессов посвящена работа [165]. Для назначения технологических баз предлагается использовать геометрическую схему технологического процесса (ГСТП), под которой понимается совокупность поверхностей заготовки, предварительно обработанных поверхностей и поверхностей готового изделия, а также размеров и соотношений, связывающих все эти поверхности. ГСТП представляется в виде графа, в котором вершины – элементарные или типовые поверхности, а ребра – размеры или условия взаимного расположения.

За критерий оптимальности назначения баз, под которыми понимаются вершины на графе, выбрана сумма стоимостных оценок тех

элементов обработки изделия, которые в наибольшей степени зависят от выбранной совокупности технологических баз:

$$C_{\Sigma} = \min \Sigma(g_{is1} + g_{is2}),$$

где  $\min \Sigma$  – функция минимума суммы;  $g_{is1}$  – затраты на зарплату основных рабочих, эксплуатацию и амортизацию станочного оборудования и режущего инструмента, отнесенные к переходу;  $g_{is2}$  – приведенные затраты на эксплуатацию и амортизацию установочно-зажимных приспособлений.

Задача назначения технологических баз формулируется как задача построения графа с заданными свойствами. Каждой вершине  $\Pi_{i\alpha}$  графа  $G = (\Pi, R)$  приписан кортеж, элементы которого являются кодами геометрической формы поверхности и кодами вида обработки. Каждому ребру соответствует номинальное значение размера, допуск на размер, код координатного направления размера. Вершины графа можно соединять дугами – технологическими размерами  $S_{ij} = (\Pi_i \Pi_j)$ , для каждой из которых вычисляется кортеж, элементами которого являются: минимальное значение операционного размера, допуск на операционный размер, код координатного направления размера, вес дуги.

Вес дуги

$$g_{ij} = g_{is1} + g_{is2},$$

где  $g_{is1}$  – является функцией от допуска на размер и кода геометрической формы поверхности;  $g_{is2}$  – является функцией кода геометрической формы поверхности, вида обработки поверхности и размера.

Задача назначения технологических баз решается построением надграфа, имеющего минимальный суммарный вес дуг. Для решения задачи строится полный симметричный граф, находятся кратчайшие пути, некоторым дугам приписываются штрафы, назначаются вторичные размеры, выбираются черновые базы.

Однако эта работа направлена на анализ графов для детали типа «штулка и вал», в котором ребра – размеры. Правил построения графа по условиям взаимного расположения поверхностей и формальных правил определения числа связей, накладываемых базовыми поверхностями, нет. Неясно, как численно определяются значения  $g_{is1}$  и  $g_{is2}$ .

В настоящее время развиваются подходы к технологической подготовке и организации машиностроительного производства на основе *модульной технологии*. В работах [167–175] впервые предлагается рассматривать деталь не как совокупность взаимосвязанных поверхностей, а как совокупность взаимосвязанных функциональных модулей. В них приводится общая концепция модульной технологии, вопросы инструментального обеспечения, проектирования приспособлений, результаты

внедрения принципов модульной технологии изготовления деталей, а также рассмотрены вопросы построения модульных технологических процессов и методология их автоматизированного проектирования [170]. Под модулем поверхностей (МП) понимается сочетание поверхностей или отдельная поверхность, выполняющая соответствующую служебную функцию детали.

В работе [170] деталь представлена множеством  $A = (G_i, \dots, G_m)$ . Каждый его элемент является упорядоченным множеством элементарных поверхностей детали, называемых группой элементов  $G_i = (a_i, \dots, a_j)$ . Группа получается на основании логического условия, построенного на отношении смежности (связи)  $R$  между элементами детали. Группой из  $k$  элементов называется такое сочетание, для которого найдутся один или два несмежных между собой элемента (основание группы), с которым остальные  $(k-2)$  элемента (контур группы) имеют отношение смежности, а сами они последовательно смежные между собой. Элементы объединяют по технологическому признаку – в комплексные группы и по служебному назначению – в МП, по технологическому признаку – в агрегатированные группы.

Конструкторские связи между элементарными поверхностями (элементами) детали или осями (точками) отражаются бинарными отношениями  $(a_i R a_j)$ , где  $R = \alpha, L$  и  $\beta$ ;  $\alpha$  – отклонение взаимного расположения элементов от номинала;  $L$  – координирующие и собственные размеры элементов;  $\beta$  – угловые размеры. Конструкторские связи представляются множеством  $M = (M_1..M_i,.. M_j)$ , где  $M_i$  – элементарный путь графа связей  $R$  и множеством  $V = (R_1..R_i,..R_j)$ , где  $R_i$  – численное значение связей. Проектирование технологического процесса должно сводиться к его компоновке из технологических блоков (ТБ), однако не указано, как это сделать. ТБ – часть технологического процесса, разработанная для конкретного МП. ТБ содержит последовательность переходов, обусловленную конструктивным оформлением МП детали, его размерами, требованиями к качеству, а также заготовительным интегральным модулем МПИЗ, который определяет обрабатываемый материал и величину припусков, подлежащих съему с каждой поверхности МП. Для осуществления ТБ предлагается создавать соответствующие станочные модули (МС), модули приспособлений (МПр), инструментальные модули (МИ) и модули контрольно-измерительных средств (МКИ). Технологические базы предлагается выбирать следующим образом. Из множества  $V$  выделить те внешние связи, которые относятся к МП, представляющим собой основные и вспомогательные базы детали. На основании результатов последовательного анализа связей  $\alpha, L$  и  $\beta$  и условий доступа к обрабатываемым поверхностям определить множество МП, представляющее собой вспомогательные базы детали, которые можно обработать от МП, являющихся ее основными базами. Затем аналогичным образом от МП, включающих в себя поверхности вспомо-

гательных баз, необходимо определить те, от которых могут быть обработаны МП, включающие в себя поверхности основных баз, а также базы для оставшихся МП. Следует отметить, что в работе не предлагается методика формирования множеств  $M$  и  $V$ . Утверждается, что связи  $R$  можно ранжировать при выборе технологических баз (приоритет связей  $\alpha >$  приоритета связей  $L \gg$  приоритета связей  $\beta$ ), и в том случае, если требования к отклонениям расположения элементов на чертеже не проставлены, то они невысоки, а для выбора технологических баз необходимо проводить анализ связей  $L$  и  $\beta$ . Не учитываются положения ГОСТа на неуказанные требования взаимного расположения поверхностей.

В работе не учитывается то, что далеко не все МП могут как комплект ТБ включить 6 связей, и в комплект ТБ необходимо включать компоненты нескольких МП. Не предложена методика определения числа связей, которая накладывает база. Не учтены положения о том, что базы (как на первой операции, так и на последующих) необходимо определять для каждого этапа механической обработки с учетом конфигурации заготовки на этапе.

В работах [176,177] предлагается формализацию технологических процессов осуществлять на основе статистического определения наиболее часто встречающихся в изделии конструктивных элементов и поверхностей деталей, применяемых при их получении переходов (режим резания, оснастка, режущий инструмент), унификации конструктивных элементов, видов обработки резанием, станков, приспособлений и режущих инструментов с учетом их степени сложности и создания мобильного (быстрого и с минимальными затратами перестраиваемого) производства с использованием унифицированных технологических модулей.

В работе [178] излагаются результаты исследований Государственного научного учреждения «Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси» по моделированию машиностроительных объектов, а также результаты по формализации и алгоритмизации процессов проектирования на всех стадиях создания новой продукции на основе понятия элемента конструкции. Приводятся основы концептуальной модели структурной организации машиностроительных конструкций, описано представление конструктивных элементов в структурно-параметрической модели. Приведен обзор САПР технологической оснастки (сверлильных, токарных, фрезерных приспособлений), описывается принцип сквозного конструирования и запуска в производство деталей типа «тела вращения». Вопросы синтеза маршрута обработки, схем базирования и операций механической обработки для оригинальных нетиповых деталей не учитываются.

В некоторых работах по алгоритмизации проектирования маршрута обработки заготовки размерные и пространственные связи не рас-

считались вовсе. Так в работе [179, 180] предлагается маршрут обработки заготовки формировать на основе множества элементарных технологических переходов для поверхностей и совокупности правил (ограничений) на совмещение элементарных переходов и последовательности их выполнения. Под этими правилами понимаются следующие выражения: нельзя в различных позициях выполнять переход  $X_i$ ; каждый переход должен быть реализован на одной позиции; на одной позиции выполняются только совместимые переходы. Алгоритм основан на методе ветвей и границ и на методе Магу.

В работе [181] предлагается определять последовательность обработки технологических элементов комбинаторным методом, сокращая возможные варианты с помощью матрицы приоритетов и обязательных последовательностей, которые формируются на основе эвристических правил типа: «Для предотвращения прерывистого резания необходимо применить точение до фрезерования на деталях класса «тела вращения». Определена матрица обязательных последовательностей для деталей типа корпус. Основное внимание при этом уделено следующим типам поверхностей: плоскостям (FLAECHE); уступам, образованным из плоских поверхностей (ABS); отверстиям (BOR); канавкам или пазам (NUT). Предпосылками для установления взаимосвязей между каждым из двух взаимосвязанных поверхностей являлись: соотношение по расположению между рассматриваемыми поверхностями; соотношения по размерам между поверхностями и требуемое качество поверхностей; минимальный припуск. В этой работе не учитываются технологические базы и схемы установки, а также то, что точные поверхности обрабатываются несколько раз на каждом из этапов типовой схемы обработки.

В работе [182] также описывается решение задачи построения структуры расточных операций комбинаторными методами с помощью последовательного преобразования ряда матриц на основе выявления ряда ограничений (как по формальным правилам, так и на основе опыта и интуиции технолога).

В работе [183] описывается система поддержки принятия решений (DecisionSupportSystems – DSS) при проектировании маршрута обработки заготовки на агрегатных станках. Формирование регламентов на синтез ТП предлагается осуществлять в два этапа. На первом этапе учитываются так называемые «сложившиеся неформальные правила проектирования подобного класса ТП», некоторые инженерные эвристики и возможности агрегатного оборудования в конкретных условиях: выделение черновых, получистовых и чистовых переходов; необходимость или недопустимость совмещения отдельных групп переходов в одном блочном переходе (обусловлена повышенной точностью взаимного расположения конструктивных элементов лежащих на одной или нескольких сторонах), невозможность обеспечения общих параметров режима обработки и др. На втором этапе в группы сформировавшихся

ограничений проектировщиком вносится правка внесением своих ограничений. Синтез ТП осуществляется по оптимизационным моделям, в которых целевая функция отражает стремление минимизировать стоимость оборудования, а ограничения обеспечивают производительность, определяют выполнение всех переходов, выполнение условий предшествования операций и их совмещения в блоке и на позиции, а также ограничения на число блоков на позиции. Вопросы обеспечения требований взаимного расположения поверхностей, а также проблема синтеза схем базирования и установки не учтены.

## 1.5 Приоритетные направления исследований

В опубликованных работах по теории базирования приводится различная терминология и классификация баз, но не приводится каких-либо алгоритмов, правил проектирования схем базирования, схем установки, ориентации заготовки, выдачи задания на проектирование приспособлений как для традиционного субтрактивного производства, так и для аддитивных технологий. Теория базирования в аддитивном производстве не рассматривается вовсе.

В практической работе технолог и контролер вполне могут обходиться и вовсе без теории базирования. В каждом конкретном случае ее заменяют опыт, знания и здравый смысл. Иное дело – задача автоматизации синтеза единичной индивидуальной технологии изготовления детали. Здесь необходимо сформировать информационную конструкторско-технологическую модель заготовки и детали, выделить цель и задачи базирования, разработать понятийный и алгоритмический аппарат.

В настоящее время развиваются подходы к технологической подготовке и организации мобильного машиностроительного производства на основе *модульной технологии*. Модульная технология дает возможность представления детали сложной формы в виде структурированной совокупности функционально-технологических элементов для решения задачи автоматизации синтеза единичной технологии. Что в свою очередь может на порядок уменьшить сроки технологической подготовки производства и создать условия для кастомизации продукции.

Поскольку инструментарий теории базирования должен служить обеспечению точности взаимного расположения функциональных модулей то, для формирования информационной конструкторско-технологической модели нетиповой оригинальной детали сложной формы и ее заготовки на основе модульной технологии, кроме классификации конструктивно-технологических элементов изделий, необходимо разработать формат описания и представления геометрических связей между ними.

Появление множества трактовок, концепций и подходов к проблеме базирования и разработки моделей заготовок деталей для автоматизации проектирования технологии, очевидно, является следствием несовершенства положений ГОСТ 21495-77 «Базирование и базы в машиностроении. Термины и определения», а именно:

- недостаточно явно или вовсе не разграничиваются понятия проектного и реального базирования, теоретической схемы базирования и установки *для каждого из этапов «жизни» объекта производства*; так, при иллюстрации технологической базы (под которой понимается база, используемая для определения положения заготовки или изделия в процессе изготовления или ремонта) приводятся примеры реальной установки *заготовки* в приспособлении при механической обработке;

- в один уровень классификации, согласно которой все базы подразделяются на конструкторские (основные и вспомогательные), технологические и измерительные, выделены понятия по разным признакам, относящимся к детали и к поверхностям детали;

- при базировании речь идет о шести механических связях, хотя при проектировании схем базирования нужно вести речь не о механических, а о геометрических связях конструктивных элементов друг относительно друга;

- понятие «базирование» относится исключительно к заготовке или изделию целиком, а не к поверхностям или элементам конструкции;

- в определении технологической базы ничего не говорится о *цели проектирования схемы базирования и комплекта баз* при механической обработке, аддитивном синтезе; сборке и контроле; при проектировании схемы базирования механической обработки относительно комплекта технологических баз (под которыми понимаются совокупность поверхностей заготовки) ориентируется *обрабатываемая поверхность* или их сочетание; на этапе проектирования схемы установки – *заготовка* ориентируется относительно проектных установочных компонентов, а на этапе реальной установки заготовки, на станке происходит ориентация заготовки относительно приспособления;

- аддитивные технологии нашли широкое применение, однако при аддитивном синтезе не используются приспособления аналогичные механической обработке или сборке; здесь речь идет об ориентации заготовки в рабочей зоне 3D-принтера.

Таким образом, для создания научно-методических основ автоматизированного проектирования процессов базирования, прежде всего необходимо разработать систему положений, определений и понятий реального и проектного базирования заготовок и деталей применительно к аддитивному и субтрактивному производствам, а также создать принципы моделирования нетиповых деталей с учетом основных признаков базирования в аддитивном и субтрактивном производствах.

## 2 КЛАССИФИКАЦИЯ И ПОНЯТИЙНЫЙ АППАРАТ БАЗИРОВАНИЯ В ЗАДАЧАХ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

### 2.1 Классификация баз

Базирование в машиностроении на самом высоком уровне классификации следует делить на реальное и проектное.

Под *реальным технологическим базированием* будем понимать процессы:

- ориентации заготовки (или элементов заготовки) и формообразующих элементов инструментов заданной зоне станка при обработке (реальное базирование при механической обработке);

- ориентации слоев заготовки и слоеобразующих элементов (лазер, экструдер и т. д.) в заданной зоне 3D-принтера (реальное базирование при аддитивном синтезе);

- взаимной ориентации деталей, сборочных единиц или их элементов при сборке изделия (реальное базирование при сборке);

- ориентации средств измерения по отношению к измеряемому объекту в процессе измерения (реальное базирование при измерении).

При механической обработке поверхности заготовки и формообразующие поверхности инструмента следует ориентировать так, чтобы направляющая и образующая будущих поверхностей были верно сориентированы относительно подачи станка. В принципе, можно обрабатывать поверхности и на станке, даже если они не сориентированы относительно подачи. Для этого необходимы дополнительное управление и измерения, которые бы соответствующим образом связывали перемещения. При такой обработке снижаются производительность и качество (форма поверхности), а также значительно повышается себестоимость.

В технологии машиностроения используются три метода реального базирования при механической обработке: 1) выверкой по разметке; 2) выверкой по реальной технологической базе; 3) сопряжением.

При базировании заготовки, показанной на рисунке 11 а, на столе станка контроль положения линий разметки осуществляется штангенрейсмусом, а также с помощью чертилки 1, закрепленной в оправке 2.

При базировании выверкой по реальной технологической базе правильность положения объекта контролируется точными средствами (индикатором, микроскопом и т. д.). При механической обработке выверяется параллельность технологической базы направлению подачи, положение оси отверстия относительно оси шпинделя станка, биение заготовки.

Базирование сопряжением осуществляется при соприкосновении поверхностей заготовки с установочными (установочно-зажимными) элементами (в том числе станочного приспособления) и (или) поверхностями стола станка. Пример базирования сопряжением при механической обработке показан на рисунке 11 б. Данный метод обеспечивает как высокую производительность, так и достаточно высокую точность базирования.

Для сборочных приспособлений необходимо такое ориентирование *сопрягаемых поверхностей* соединяемых деталей, которое обеспечит известные условия собираемости.

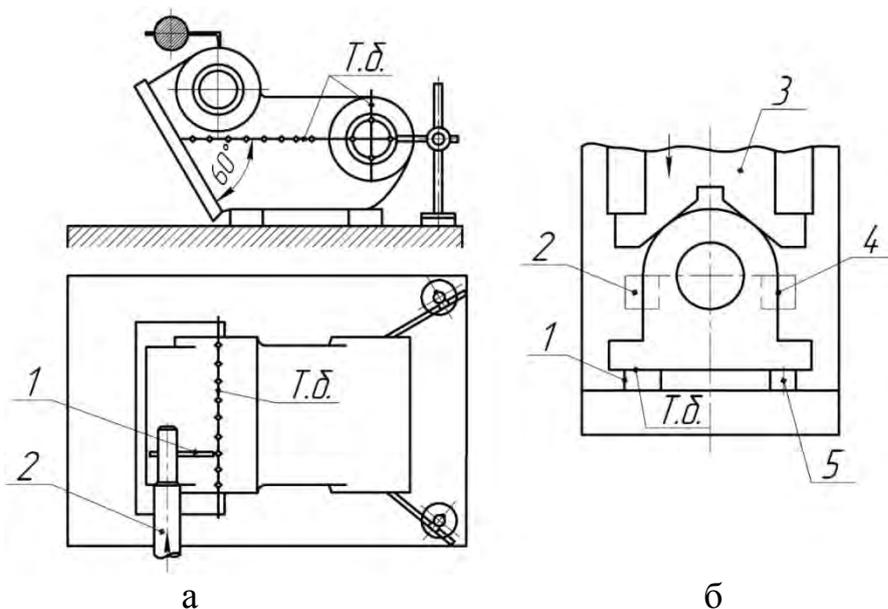


Рисунок 11 – Реальное базирование заготовки:

а – выверкой по разметке, б – сопряжением;

1 и 5 – опорные планки; 2 и 4 – упоры; 3 – подвижная призма

Для контрольных приспособлений и комплексных калибров необходимо такое ориентирование *контролирующих компонентов* относительно компонентов проверяемой детали, служащих началом отсчета, которое обеспечит надежное обнаружение годных и негодных (брак) деталей.

В *аддитивном производстве* при 3D-печати приспособления для установки заготовок, аналогичные станочным и сборочным приспособлениям, зачастую не используются. Точность получаемых при печати деталей обуславливается рядом факторов, таких как:

- 1) вид печати (SLA, SLS, FDM, DLP и др.);
- 2) применяемый для печати материал;
- 3) толщина слоя печати (разрешение);
- 4) конструкция поддержек;
- 5) температурные деформации материала в процессе затвердения;

- 6) компоновочная схема принтера;
- 7) жесткость и точность изготовления деталей принтера;
- 8) качество сборки и калибровки принтера;
- 9) конструкция и точность механических передач и приводов (точность перемещения слоеформирующих элементов);
- 10) конструкция и ориентация направляющих;
- 11) ориентация модели детали в рабочей зоне принтера.

Факторы 6–11 оказывают особое влияние на взаимное расположение слоев при печати и, как следствие, на обеспечение точности допусков расположения поверхностей (рис. 12). Если допуски взаимного расположения не обеспечены, то деталь неизбежно перейдет в неустранимый брак. Задачи обеспечения точности допусков расположения поверхностей деталей машин в аддитивном производстве должны решаться уже на этапе базирования (ориентации) модели детали в рабочей зоне принтера с помощью программ-слайсеров за счет правильного выбора баз с учетом регламентированной (измеренной) точности принтера.

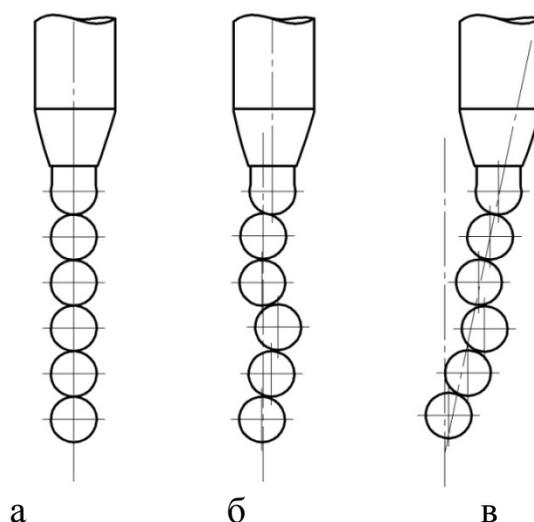


Рисунок 12 – Влияние положения экструдера при FDM-печати на ее качество:

а – идеальное расположение слоев, б – погрешность позиционирования по длине, в – погрешность расположения направляющих

Процессу реального базирования должен *предшествовать* процесс *проектного базирования* – разработки моделей указанных выше процессов.

*Проектное технологическое базирование* при механической обработке должно использоваться при проектировании технологического процесса обработки заготовки детали и станочных приспособлений.

*Проектное технологическое базирование* при аддитивном синтезе используется при проектировании технологического процесса

3D-печати детали для определения ориентации ее модели в рабочей зоне 3D-принтера.

*Проектное технологическое базирование при сборке* используется при проектировании технологии сборки и сборочных приспособлений.

*Проектное технологическое базирование при измерении* используется при проектировании технологии измерения и самих средств измерения.

На рисунке 13 приведена предлагаемая классификационная схема базирования в машиностроении.

Именно процессам проектного базирования при механической обработке и аддитивном синтезе посвящена монография. Вопросы базирования при сборке и контроле не рассматриваются.

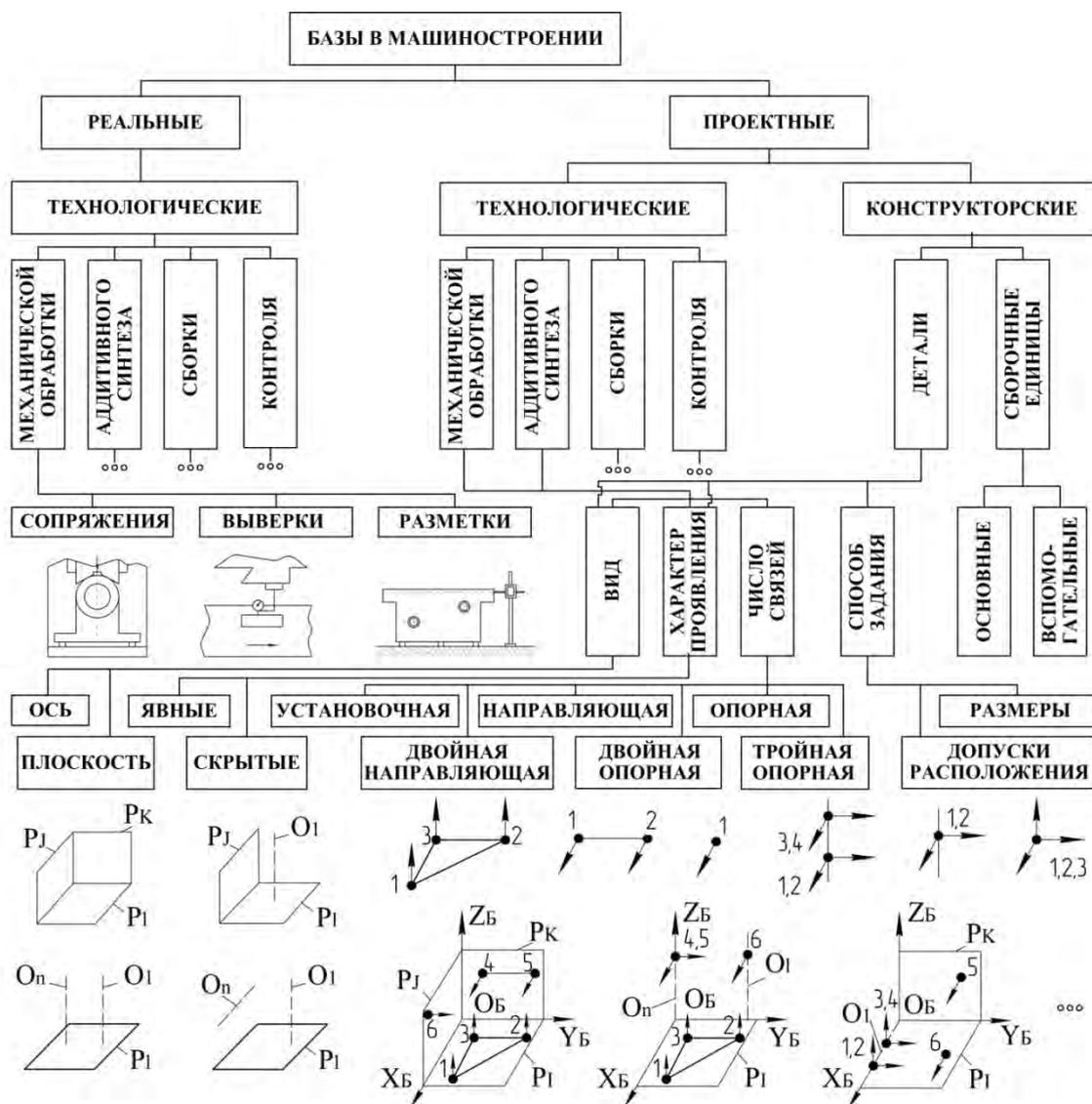


Рисунок 13 – Классификационные схемы баз в машиностроении

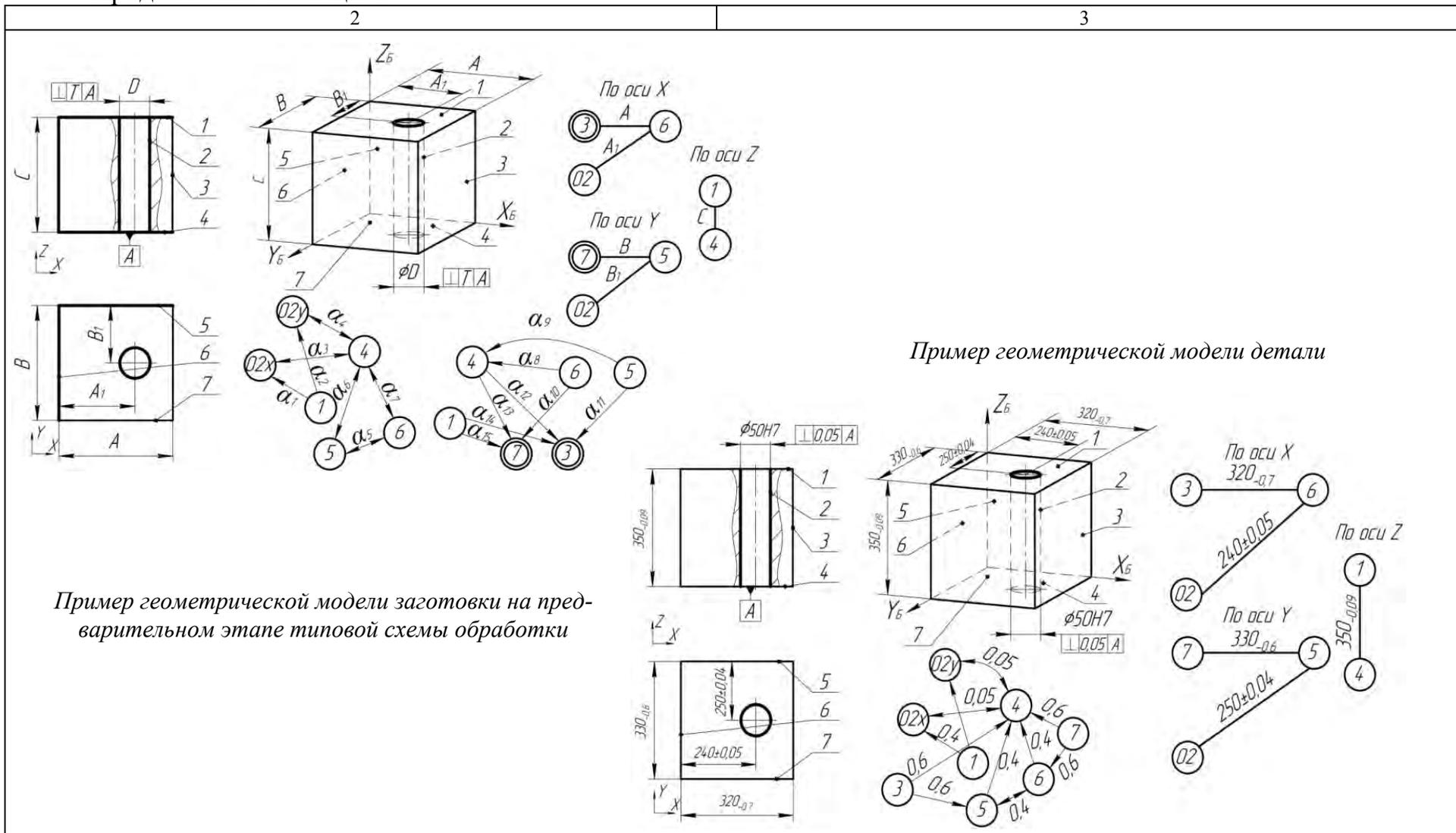
## 2.2 Система терминов и определений

В таблице 1 приведена предлагаемая система терминов и определений проектного базирования для субтрактивного и аддитивного машиностроительных производств.

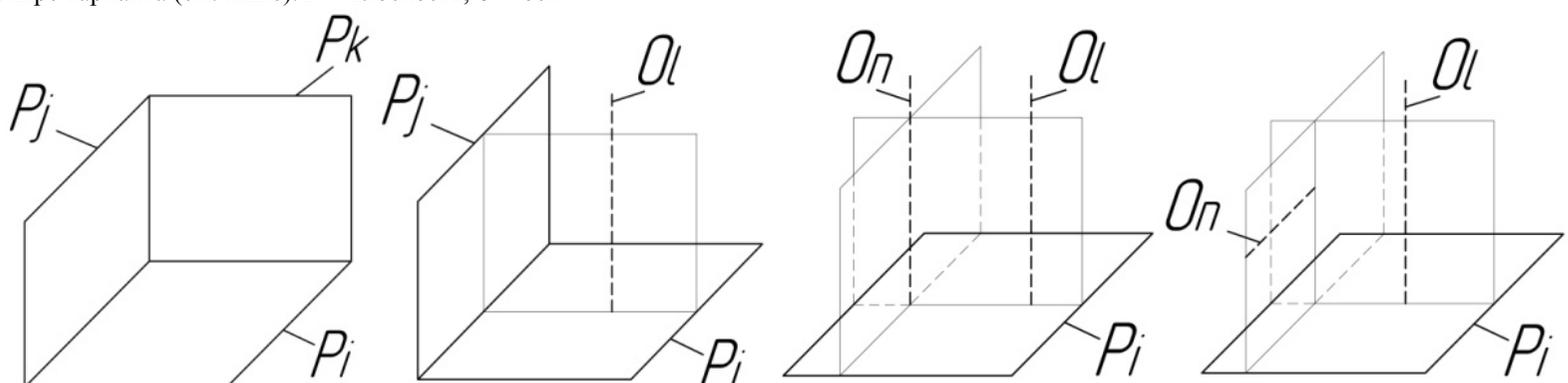
Таблица 1 – Термины и определения проектного базирования

Термины	Определения	
	Механическая обработка	Аддитивный синтез
1	2	3
Деталь	Объект производства из однородного по наименованию и марке материала после выполнения последнего перехода технологического процесса	
Заготовка детали	Объект производства из однородного по наименованию и марке материала, из которого изменением формы, размеров, свойств поверхности и(или) материала изготавливают деталь (по ГОСТ 3.1109)	
Исходная заготовка	Заготовка перед первой технологической операцией обработки (по ГОСТ 3.1109)	
Чертеж детали Чертеж исходной заготовки	Документ, содержащий контурное изображение детали (исходной заготовки), и другие данные (размеры и их предельные отклонения, допуски формы и расположения поверхностей, требования к шероховатости поверхностей, сведения о материале, термической обработке и другие), необходимые для ее изготовления, контроля, идентификации и операций с самим документом. Чертежи детали и исходной заготовки – основа создания геометрических моделей деталей, исходных заготовок и заготовок (на этапах и (или) операциях)	
Геометрическая модель заготовки детали (ГМЗ) Геометрическая модель детали (ГМД) Геометрическая модель исходной заготовки (ГМИЗ)	ГМЗ – модель, отражающая обрабатываемые на рассматриваемом этапе (операции) и обработанные на предыдущем этапе (операции) поверхности (в том числе плоскости, оси и точки симметрии) и их расположение с помощью обозначений размерных связей (линейных и угловых) и допусков расположения (графов обозначений линейных размерных связей и угловых расположений). Модель представляет собой абсолютно твердое тело, в котором все поверхности идеальны (не имеют погрешностей формы и микронеровностей)	ГМД (ГМИЗ) – модель, отражающая поверхности (в том числе плоскости, оси и точки симметрии) и их расположение с помощью размерных связей (линейных и угловых) и допусков расположения согласно чертежу (графов линейных размерных связей (по трем осям) и угловых расположений). Модель представляет собой абсолютно твердое тело, в котором все поверхности идеальны (не имеют погрешностей формы и микронеровностей)
Граф обозначений линейных размерных связей. Граф линейных размерных связей	Граф обозначений линейных размерных связей – граф типа «дерево», вершинами которого являются пронумерованные поверхности (плоскости и оси поверхностей вращения) ГМЗ, а ребрами – обозначения линейных размеров	Граф линейных размерных связей – граф типа «дерево», вершинами которого являются пронумерованные поверхности (плоскости и оси поверхностей вращения) ГМД (ГМИЗ), а ребрами – связывающие их размеры с допусками

Продолжение таблицы 1



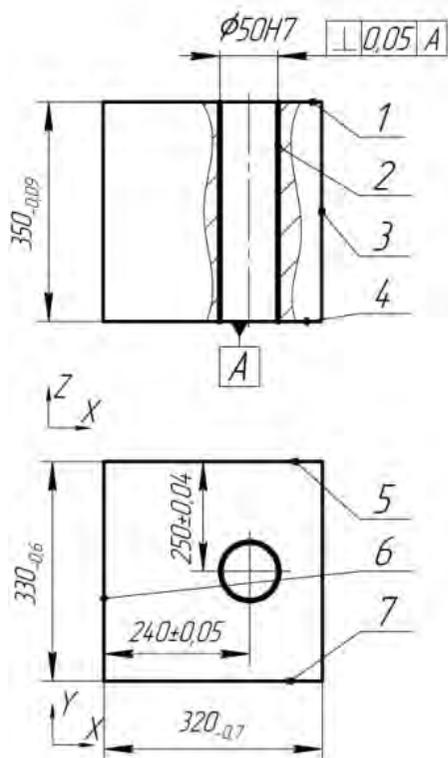
Продолжение таблицы 1

1	2	3
<p>Граф обозначений угловых расположений.</p> <p>Граф угловых расположений</p>	<p>Граф обозначений угловых расположений – ориентированный граф, вершинами которого являются пронумерованные поверхности (плоскости и оси поверхностей вращения) ГМЗ, а ребрами – обозначения угловых размеров</p>	<p>Граф угловых расположений – ориентированный граф, вершинами которого являются пронумерованные поверхности (плоскости и оси поверхностей вращения) ГМД (ГМИЗ), а ребрами – угловые размеры, заданные в явном виде (угловые размеры и допуски перпендикулярности и угла), а также по умолчанию (согласно ГОСТ 25069)</p>
<p>Обозначение размерных связей и допусков расположения на ГМЗ</p>	<p>Буквенное наименование размерных связей и допусков расположения обрабатываемых на рассматриваемом этапе (операции) и сформированных (обработанных) на предыдущем этапе (операции) поверхностей на ГМЗ сообразно их простановке на чертеже.</p> <p>Обозначение производится для обеспечения принципа единства конструкторских и технологических баз</p>	<p>Размерные связи ГМД (ГМИЗ) – размерные связи с чертежа детали (исходной заготовки)</p>
<p>Базирование</p>	<p>Ориентация рассматриваемого объекта (поверхности, ГМЗ, ГМД, ГМИД и т. д.) относительно системы координат другого объекта</p>	
<p>База</p>	<p>Поверхность или сочетание поверхностей используемых для базирования</p>	
<p>Скрытая база</p>	<p>Условная поверхность ГМД, ГМЗ или ГМИД (например, плоскость, ось, точка симметрии)</p>	
<p>Явная база</p>	<p>База отличная от скрытой. При реальном базировании речь может идти только о явных базах, при проектном – явных и скрытых</p>	
<p>Конструкторская база</p>	<p>Поверхность (или сочетание поверхностей) на чертеже или ГМД (ГМИЗ), по отношению к которой(ым) задается ориентация <i>рассматриваемой</i> поверхности (совокупности поверхностей) и определяющая компонент (компоненты) <i>состава баз ориентации</i>. Ориентация задается с размерными связями (линейными и угловыми) и допусками расположения</p>	
<p>Состав баз ориентации</p>	<p>Совокупность поверхностей (в общем случае плоскостей и(или) осей) ГМД (ГМИЗ) или ГМЗ, по отношению к которой однозначно и корректно может быть задана ориентация рассматриваемой поверхности (совокупности поверхностей) и проведена система координат. Возможно четыре варианта (см. ниже). <i>P</i> – плоскость, <i>O</i> – ось</p> 	

Продолжение таблицы 1

2

3

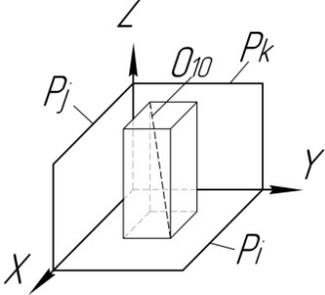
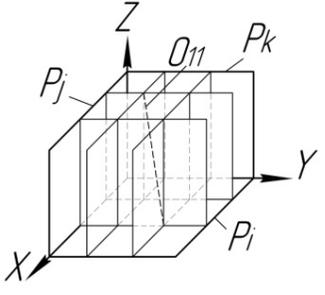
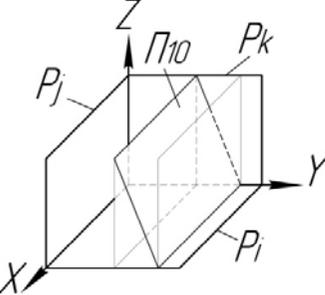
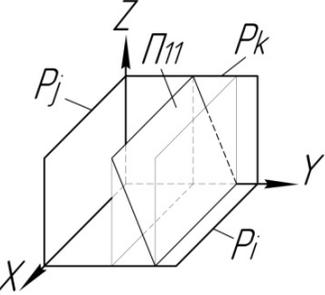
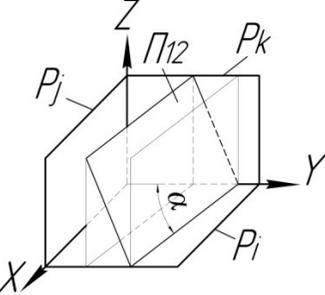
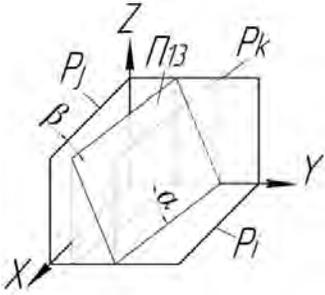


Для поверхности 6:  
 по оси Z: база – поверхность 4 (согласно ГОСТ 25069)  
 по оси X: база – поверхность 3 или O2 (ориентация задана размером  $320_{-0,7}$  или  $240 \pm 0,05$ )  
 по оси Y: база – поверхность 5 (по ГОСТ 25069)  
 Составы баз ориентации или три плоскости 4,3,5 или две плоскости и ось 4,O2,5.

Для поверхности 2:  
 по оси Z: база – поверхность 4 (ориентация задана допуском перпендикулярности)  
 по оси X: база – поверхность 6 (ориентация задана размером  $240 \pm 0,005$ )  
 по оси Y: база – поверхность 5 (ориентация задана обозначением размера  $250 \pm 0,04$ )  
 Состав баз ориентации – три плоскости 4,6 и 5 и т.д.

Пример определения конструкторских баз и составов баз ориентации

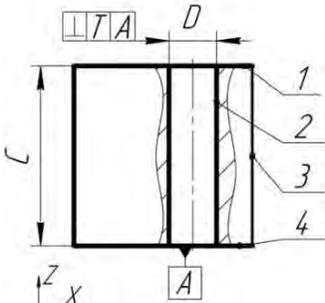
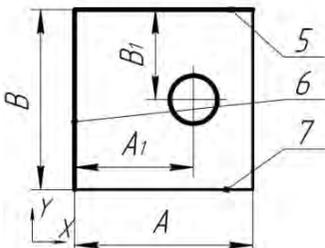
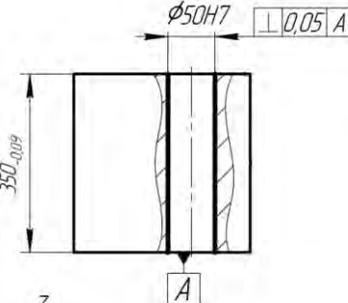
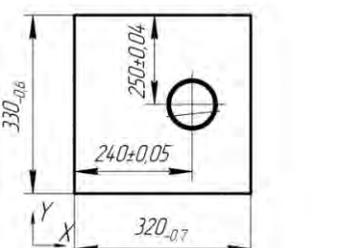
Продолжение таблицы 1

1	2	3	
<p>Однозначное и корректное задание ориентации оси</p>	<p>Задание допусков расположения <i>оси</i> осесимметричного элемента конструкции (поверхности вращения) на ГМД (ГМИЗ) или оси, рассматриваемой обрабатываемой поверхности на ГМЗ <i>необходимым и достаточным числом показателей</i>. Так ось может быть: перпендикулярна только к одной плоскости или параллельна двум пересекающимся плоскостям, или параллельна к одной плоскости и составлять некоторый угол с плоскостью, которая перпендикулярна первой и т. д. (см. приложение А).</p> <p>Ниже приводятся иллюстрации расположений полей допусков расположения и символьные модели задания ориентации оси относительно состава баз ориентации – три взаимно перпендикулярные плоскости</p>	 <p><math>O_{10} \perp P_{i(j,k)}</math></p>	 <p><math>O_{11} // P_i \wedge O_{11} // P_j</math></p>
<p>Однозначное и корректное задание ориентации плоскости</p>	<p>Задание допусков расположения плоского конструктивного элемента (плоскости) на ГМД (ГМИЗ) или рассматриваемой обрабатываемой плоскости на ГМЗ <i>необходимым и достаточным числом показателей</i>. Так плоскость может быть: перпендикулярна к двум пересекающимся плоскостям или к оси или перпендикулярна к одной плоскости и составлять некоторый угол с другой, которая перпендикулярна к первой и т. д. (см. приложение А).</p> <p>Ниже приводятся иллюстрации расположений полей допусков расположения и символьные модели задания ориентации плоскости относительно состава баз ориентации – три взаимно перпендикулярные плоскости</p>	 <p><math>\Pi_{10} \perp P_i \wedge \Pi_{10} \perp P_j</math></p>	 <p><math>\Pi_{11} // P_i</math></p>
		 <p><math>\Pi_{12} \perp P_i \wedge \Pi_{12} \angle P_{k,j}</math></p>	 <p><math>\Pi_{13} \angle P_i \wedge \Pi_{13} \angle P_{k,j}</math></p>

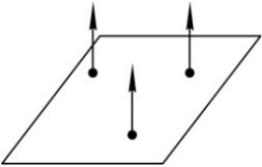
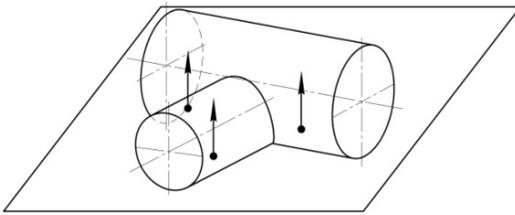
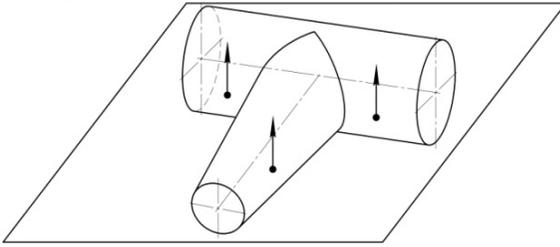
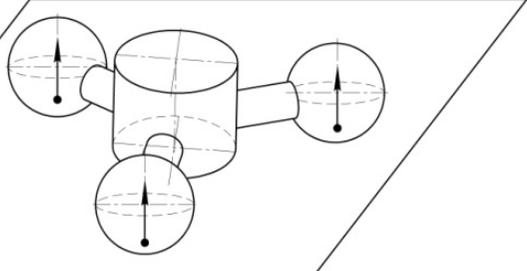
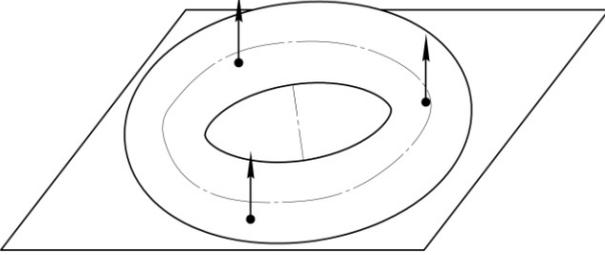
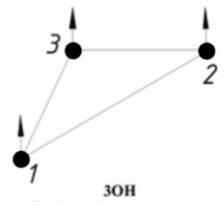
Продолжение таблицы 1

1	2	3
<p>Корректное и некорректное указание допуска расположения</p>	<p>Корректным будем считать указание допуска согласно моделям однозначного и корректного задания ориентации оси или плоскости. Иначе – некорректным.</p> <p>На рисунке допуски расположения оси указаны некорректно (см. модель <math>O_{10}</math>). Допуск параллельности оси к базе Б, указанный на чертеже детали, избыточен, так как допуск перпендикулярности относительно базы А однозначно задает относительное положение оси.</p> <p>Допуск плоскости задан корректно (см. модель <math>\Pi_{10}</math>)</p>	
<p>Технологическое базирование</p>	<p>Определение ориентации обрабатываемой поверхности (совокупности поверхностей) с приоритетным допуском расположения относительно базовой (собственной) системы координат ГМЗ, построенной на поверхностях составов баз ориентации путем наложения на них <i>шести геометрических связей</i></p>	<p>Определение ориентации поверхности (совокупности поверхностей) с приоритетным допуском расположения относительно базовой (собственной) системы координат ГМД (ГМИЗ), построенной на поверхностях составов баз ориентации путем наложения на них <i>шести геометрических связей</i></p>
	<p>Цель технологического базирования – обеспечение (уже на стадии проектирования) требуемых показателей допусков расположения поверхностей</p>	
<p>Приоритетный допуск расположения</p>	<p>Минимальный допуск расположения, определенный ранжированием численных значений допусков по поверхностям составов баз и их приведением к одной базовой длине</p>	
<p>Базовая система координат</p>	<p>Система координат (как правило, декартова), построенная на поверхностях ГМЗ (или ГМД (ГМИЗ)) путем наложения на поверхности баз ориентации <i>шести геометрических связей</i></p>	

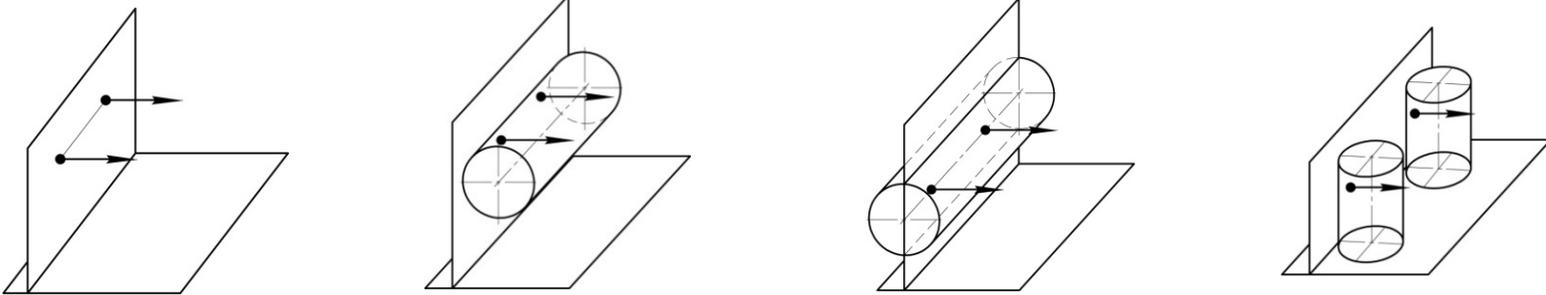
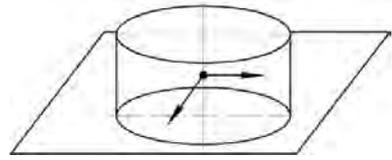
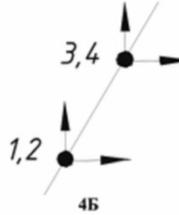
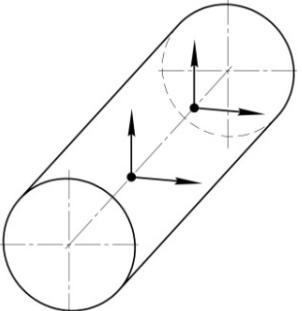
Продолжение таблицы 1

1	2	3
<p>Технологическая база</p>	<p>Поверхность (или сочетание поверхностей) ГМЗ по отношению к которой(ому) задается ориентация <i>рассматриваемой обрабатываемой поверхности (совокупности поверхностей)</i>, накладывающая на ГМЗ определенные геометрические связи и идентифицирующая(ее) одну из плоскостей или(и) осей базовой (собственной) системы координат. Ориентация задается с помощью обозначений размерных связей и допусков расположения</p>  <p>Для поверхности 6: по оси Z: база – поверхность 4 (согласно ГОСТ 25069); по оси X: база – поверхность 3 или O2 (ориентация задана обозначением размера A или A1); по оси Y: база – поверхность 5 (по ГОСТу).</p> <p>Состав технологических баз ориентации или три плоскости 4,3,5, или две плоскости и ось 4,5 O2.</p> <p>Для поверхности 2: по оси Z: база – поверхность 4 (ориентация задана допуском перпендикулярности); по оси X: база – поверхность 6 (ориентация задана обозначением размера A1); по оси Y: база – поверхность 5 (ориентация задана обозначением размера B1).</p> <p>Состав технологических баз ориентации – три плоскости 4,6 и 5 и т. д.</p> 	<p>Поверхность (или сочетание поверхностей) ГМД (ГМИЗ) по отношению к которой(ому) задается ориентация <i>поверхности (совокупности поверхностей) с приоритетным допуском расположения</i>, накладывающая на ГМД (ГМИЗ) определенные геометрические связи и идентифицирующая(ее) одну из плоскостей или(и) осей базовой (собственной) системы координат. Ориентация задается с помощью размерных связей и допусков расположения</p>  <p>Для оси с приоритетным допуском расположения:</p> <p>по оси Z: база – поверхность 4 (ориентация задана указанным допуском перпендикулярности);</p> <p>по оси X: база – поверхность 6 (ориентация задана размером <math>240 \pm 0,005</math>);</p> <p>по оси Y: база – поверхность 5 (ориентация задана размером <math>250 \pm 0,04</math>).</p> <p>Состав технологических баз ориентации – три плоскости 4,6 и 5</p> 
<p>Технологическая настроечная база</p>	<p>Поверхность, из совокупности обрабатываемых за один установ поверхностей, не имеющая непосредственной размерной связи с базовой (собственной) системой координат</p>	<p>–</p>
<p>Геометрическая связь</p>	<p>Связь, отражающая отсутствие неопределенности линейного (3 связи) и углового (3 связи) положения рассматриваемой поверхности (совокупности поверхностей) относительно осей базовой системы координат и определяющая положение точки сопряжения (соприкосновения) поверхностей ГМЗ (или ГМД (ГМИЗ)) с базовой системой координат</p>	
<p>Точка сопряжения</p>	<p>Условная точка, отражающая наличие геометрической связи расположенная одновременно на поверхности ГМЗ (или ГМД (ГМИЗ)) и плоскости базовой системы координат</p>	

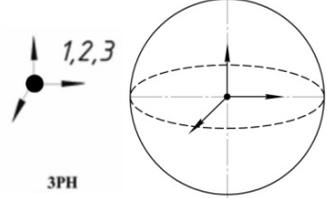
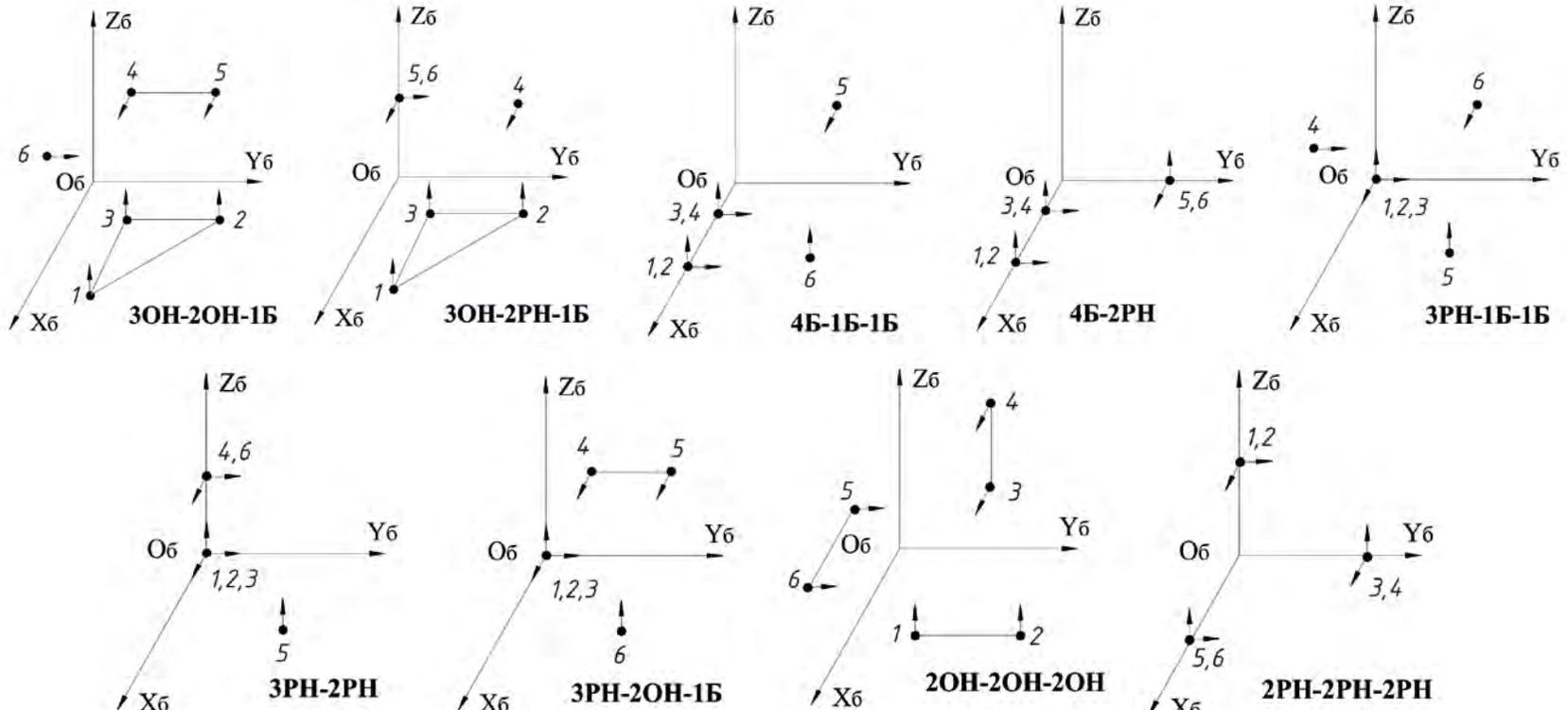
Продолжение таблицы 1

1	2	3
<p>Направляющий вектор</p>	<p>Единичный вектор с началом в точке сопряжения перпендикулярный, соответствующей плоскости базовой системы координат и имеющий одинаковое направление с осью базовой системы координат. Направляющий вектор определяет ориентацию оси базовой системы координат. Поэтому формирование базовой системы координат осуществляется одновременно с заданием направляющих векторов</p>	
<p>Тройная однонаправленная (установочная) база</p>	<p>База, накладывающая на ГМЗ (или ГМД (ГМИЗ)) три связи (одну линейную и две угловые), условно представляющая собой три точки сопряжения, не лежащие на одной прямой, имеющие одинаковое направление направляющих векторов и идентифицирующая плоскость в составе баз ориентации.</p> <p>На ГМЗ (или ГМД (ГМЗ)) может быть реализована: плоской поверхностью; двумя образующими, которые принадлежат пересекающимся или параллельным цилиндрам и лежат в одной плоскости; образующими цилиндр и конус; направляющей окружностью тора; наружными точками трех сфер, лежащих в одной соприкасающейся с ними плоскости; двумя пересекающимися (или параллельными) осями цилиндров и т. д.</p>      	
<p>Двойная однонаправленная (направляющая) база</p>	<p>База, накладывающая на ГМЗ (или ГМД (ГМИЗ)) две связи (одну линейную и одну угловую), условно представляющая собой две точки сопряжения, лежащие на одной прямой, имеющие одинаковое перпендикулярное этой прямой направление направляющих векторов и идентифицирующая плоскость в составе баз ориентации</p> 	

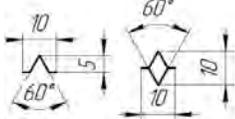
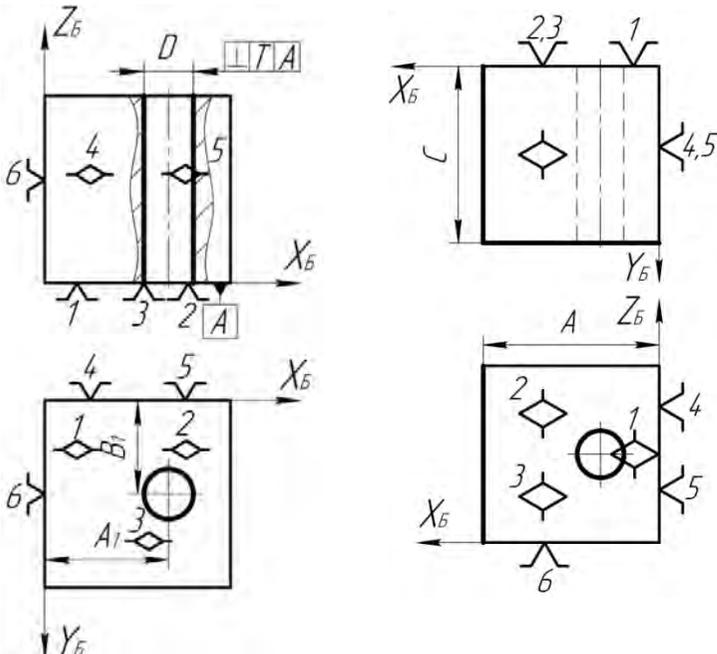
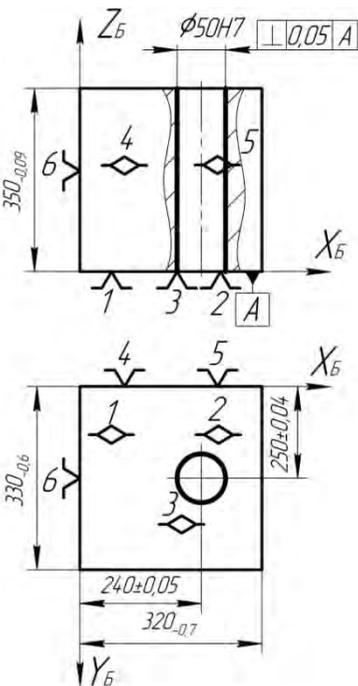
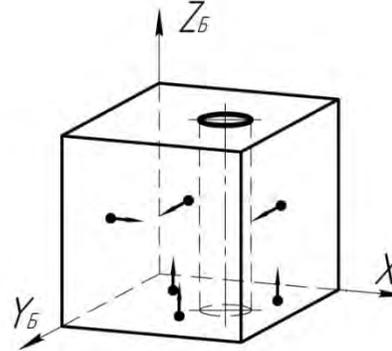
Продолжение таблицы 1

1	2	3
	<p>На ГМЗ (или ГМД (ГМИЗ)) может быть реализована: плоской поверхностью; осью цилиндра; образующей цилиндра; точками, которые лежат на общей касательной к двум наружным цилиндрам; линией пересечения двух плоскостей и т. д.</p> 	
<p>Одиночная (опорная) база</p>	<p>База, накладывающая на ГМЗ (или ГМД (ГМИЗ)) одну линейную связь, условно представляющая собой одну точку сопряжения и идентифицирующая плоскость и(или) ось в составе баз ориентации.                  На ГМЗ (или ГМД (ГМИЗ)) может быть реализована: плоской поверхностью; осью цилиндра; образующей цилиндра; линией пересечения двух плоскостей и т. д.</p>	 <p>1Б</p>
<p>Двойная разнонаправленная (двойная опорная) база</p>	<p>База, накладывающая на ГМЗ (или ГМД (ГМИЗ)) две линейные связи, условно представляющая собой две слившиеся точки сопряжения, имеющие взаимно перпендикулярные направления направляющих векторов и идентифицирующая ось (ось и плоскость) в составе баз ориентации.                  На ГМЗ (или ГМД (ГМИЗ)) может быть реализована осью «короткого» цилиндра или конуса</p>	 <p>2РН</p> 
<p>Четверная (двойная направляющая) база</p>	<p>База, накладывающая на ГМЗ (или ГМД (ГМИЗ)) четыре связи (две линейные и две угловые), условно представляющая собой четыре лежащие на одной прямой попарно слившиеся точки сопряжения, а направляющие векторы, выходящие из каждой пары слившихся точек сопряжения, взаимно перпендикулярны и идентифицирующая ось в составе баз ориентации.                  На ГМЗ (или ГМД (ГМИЗ)) может быть реализована осью «длинного» цилиндра</p>	 <p>4Б</p> 

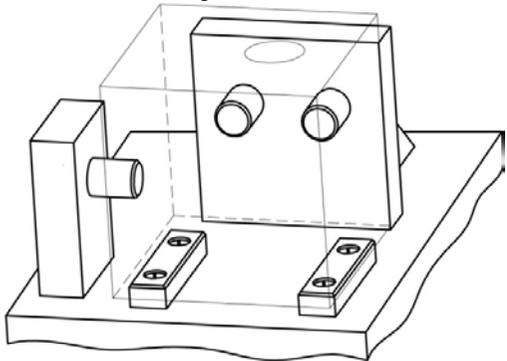
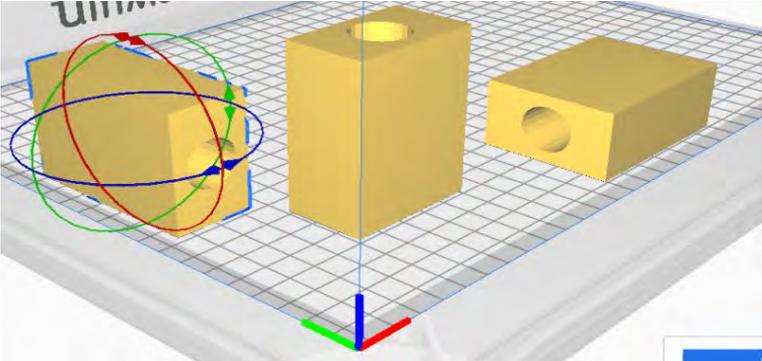
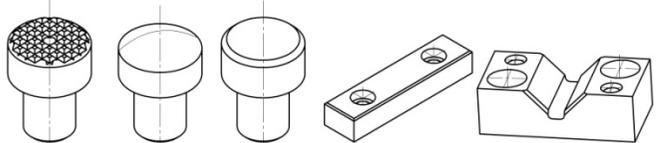
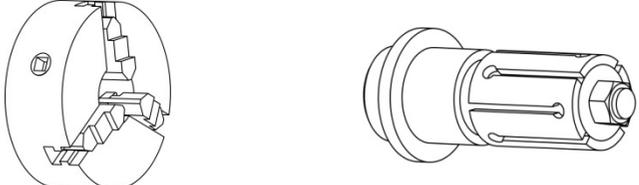
Продолжение таблицы 1

1	2	3
<p>Тройная разнонаправленная (тройная опорная) база</p>	<p>База, накладывающая на ГМЗ (или ГМД (ГМИЗ)) три линейных связи, условно представляющая собой три слившиеся точки сопряжения, имеющие взаимно перпендикулярные направления направляющих векторов и идентифицирующая плоскость или(и) ось в составе баз ориентации.                      На ГМЗ (или ГМД (ГМИЗ)) может быть реализована центром сферы</p>	
<p>Комплект технологических баз</p>	<p>Совокупность технологических баз полностью идентифицирующих состав баз ориентации и накладывающих на ГМЗ (или ГМД (ГМИЗ)) 6 геометрических связей относительно осей базовой (собственной) системы координат.                      Технологические базы могут <i>сочетаться</i> между собой в комплект девятью различными способами</p>	

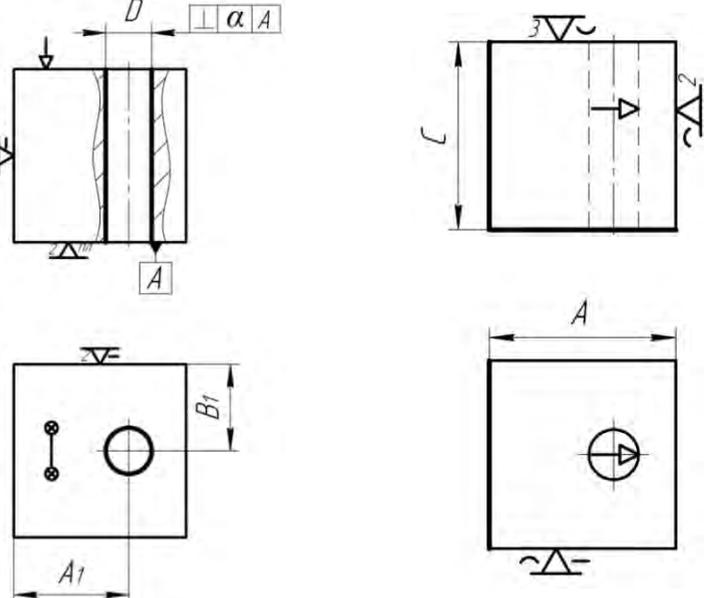
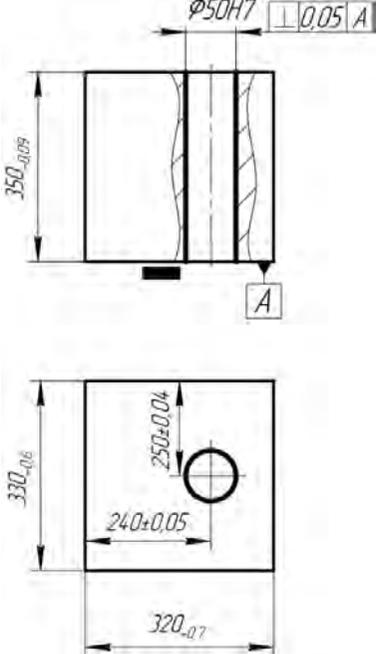
Продолжение таблицы 1

1	2	3
<p>Обозначение технологических баз</p>	<p>Нанесение на ГМЗ (или ГМД (ГМИЗ)) условных значков, интерпретирующих точки сопряжения и направляющие векторы. При этом ГМЗ (или ГМД (ГМИЗ)) считается прозрачной</p> 	
<p>50</p> <p>Схема базирования</p>	<p>Графическое изображение ГМЗ в состоянии после обработки поверхности (совокупности поверхностей) за один установ на рассматриваемой операции, на котором: 1) выделены обработанные поверхности; 2) проставлены условные обозначения выдерживаемых размерных связей и допусков расположения; 3) обозначен комплект технологических баз; 4) проведена базовая (собственная) система координат</p>  <p>Схема базирования для обработки отверстия 2</p> <p>Схема базирования для обработки плоскостей 5 и 6</p>	<p>Графическое изображение ГМД (ГМИЗ) на которой: 1) выделены поверхности (совокупности поверхностей) с приоритетным допуском расположения; 2) проставлены размерные связи и допуски расположения; 3) обозначен комплект технологических баз; 4) проведена базовая (собственная) система координат</p>  <p>Схема базирования</p>  <p>Модель расположения направляющих векторов</p>

Продолжение таблицы 1

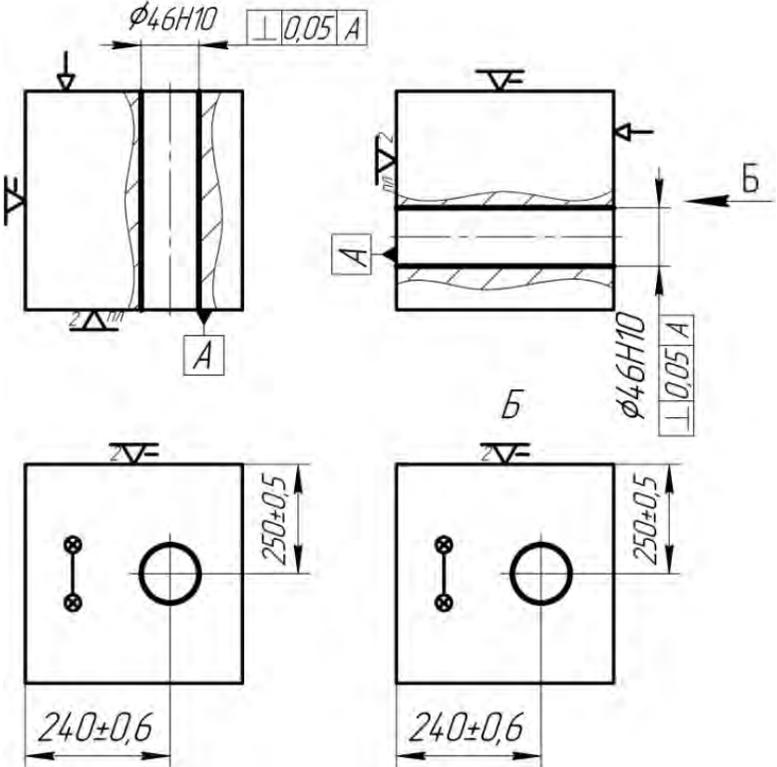
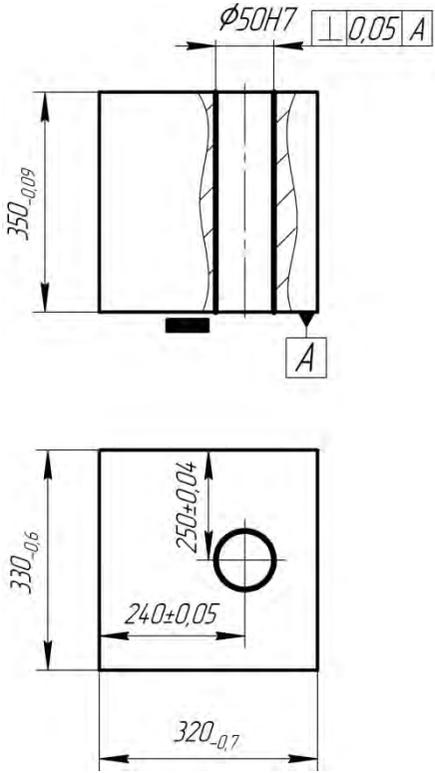
1	2	3
<p>Установка</p>	<p>Взаимная ориентация поверхностей технологических баз ГМЗ и установочных и(или) установочно-зажимных элементов (в том числе станочного приспособления) и(или) стола станка. При этом формируется установочная система координат</p> 	<p>Взаимная ориентация поверхностей технологических баз ГМД (ГМИЗ) и установочных элементов 3D-принтера в программеслайсере</p> 
<p>Установочный элемент</p>	<p>Детали, обеспечивающие ориентацию обрабатываемых заготовок (синтезируемых деталей) в рабочей зоне станка: опоры точечные (с рифленой, сферической, плоской поверхностями), пластины опорные, опоры призматические, пальцы цилиндрические и т. д.</p> 	<p>Детали для ориентации синтезируемых деталей (исходных заготовок) в рабочей зоне 3D-принтера (чаще всего поверхность стола)</p> 
<p>Установочно-зажимный элемент</p>	<p>Детали и механизмы, обеспечивающие ориентацию и закрепление обрабатываемых заготовок в рабочей зоне (трехкулачковый патрон, цанговая оправка и т. д.)</p> 	<p>—</p>

Продолжение таблицы 1

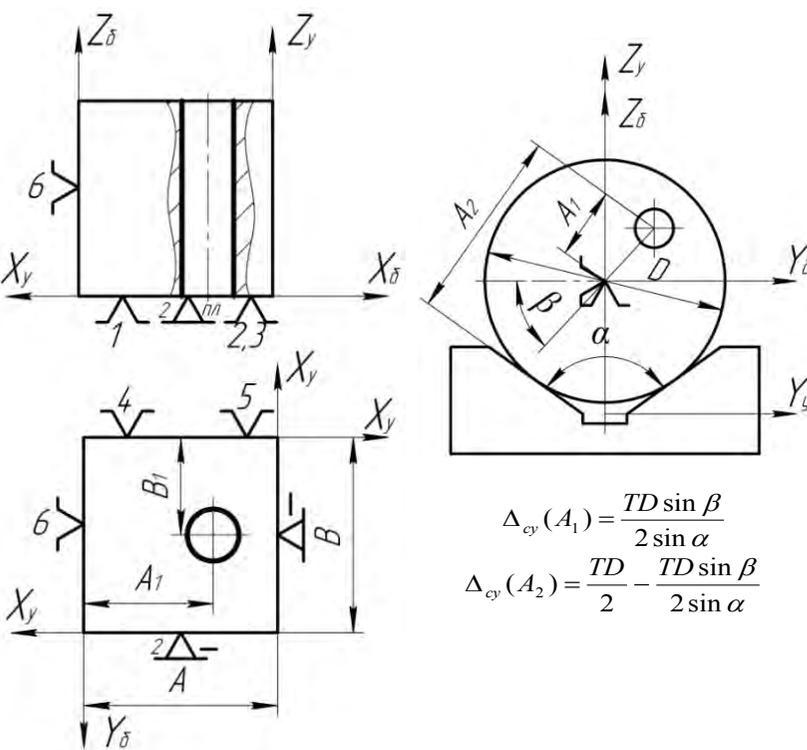
1	2	3
<p>Условные обозначения установочных и установочно-зажимных элементов</p>	<p>Обозначение установочных, установочно-зажимных элементов согласно ГОСТ 3.1107-81 «Опоры, зажимы, и установочные устройства. Графические обозначения» (приложение В).  – опора точечная с плоской поверхностью;  – опора точечная со сферической поверхностью;  – пластина опорная;  – опора призматическая;  – трехкулачковый патрон;  – оправка цанговая;  – плоская поверхность корпуса и т. д.</p>	
<p>Схема установки</p>	<p>Графическое изображение ГМЗ в состоянии после обработки поверхности (совокупности поверхностей) за один установ, на котором: 1) выделены обработанные поверхности; 2) проставлены условные обозначения выдерживаемых размерных связей и допусков расположения; 3) нанесены условные обозначения установочных и(или) установочно-зажимных элементов, а также точки приложения и направления силы закрепления (при необходимости).</p> <p>Схема установки – основа задания на выбор существующего или проектирование нового станочного приспособления</p> 	<p>Графическое изображение ГМД (ГМИЗ) на которой: 1) выделены поверхности (совокупности поверхностей) с приоритетным допуском расположения; 2) проставлены размерные связи и допуски расположения; 3) нанесены условные обозначения установочных элементов.</p> <p>Схема установки – задание пользователю программы слайсера для ориентации ГМД (ГМИЗ) в рабочей зоне 3D-принтера</p> 

Продолжение таблицы 1

53

1	2	3
<p>Операционный эскиз</p>	<p>Схема установки с изображением фронтальной проекции ГМЗ, если смотреть на нее со стороны рабочего места у станка, на которой указаны численные значения выдерживаемых размеров и допусков расположения</p>  <p style="text-align: center;">Сверильная                      Расточная</p>	<p>Схема установки с изображением фронтальной проекции ГМД (ГМИЗ), если смотреть на нее со стороны рабочего места у 3D-принтера</p> 
<p>Установочная система координат</p>	<p>Система координат, сформированная за счет контакта технологических баз с моделями установочными и установочно-зажимных элементов</p>	<p>—</p>

Окончание таблицы 1

1	2	3
<p>Погрешность схемы установки</p>	<p>Мера несовпадения базовой (собственной) и установочной систем координат. Причиной возникновения погрешности схемы установки являются погрешности размеров объекта производства, которые получены на этапах обработки, предшествующих рассматриваемому</p>  $\Delta_{cy}(A_1) = \frac{TD \sin \beta}{2 \sin \alpha}$ $\Delta_{cy}(A_2) = \frac{TD}{2} - \frac{TD \sin \beta}{2 \sin \alpha}$ $\Delta_{cy}(A_1) = TA$ $\Delta_{cy}(B_1) = TB$	<p>—</p>

### 3 МЕТОДИЧЕСКОЕ И АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПРОЦЕССОВ ПРОЕКТНОГО БАЗИРОВАНИЯ

#### 3.1 Модель объекта производства в задаче проектного базирования

##### 3.1.1 Основы модульного представления объекта производства в задаче проектного базирования

Предложенная система понятий теории базирования, в которой разграничиваются понятия реального и проектного базирования при конструировании, механической обработке, аддитивном синтезе, сборке и измерениях, введенные положения об однозначности и корректности ориентации конструктивных элементов позволяют предложить следующую методику синтеза *конструкторско-технологической модели* заготовки и детали в задаче проектного базирования.

Для синтеза моделей нетиповых (оригинальных) деталей в задаче базирования в *субтрактивном производстве* предлагается применять систему классификации функциональных модулей (ФМ) по *служебному назначению* [87–94]. Классификационное множество модулей по служебному назначению предлагается представлять в виде выражения:

$$\Phi M = (OVB) \cup (PI) \cup (KP) \cup (KM) \cup (OBH),$$

где  $(OVB)$  – множество функциональных модулей, образующих основные и вспомогательные сборочные базы;  $(PI)$  – множество модулей рабочих поверхностей;  $(KP)$  – множество крепежных функциональных модулей;  $(KM)$  – множество модулей коммуникаций;  $(OBH)$  – множество объединительных модулей.

Таким образом, с помощью классификационного множества модулей по служебному назначению деталь можно представить следующим образом:

$$KD = \Phi M_1 \cup \Phi M_2 \cup \Phi M_{j-1} \dots \cup \Phi M_j \dots \cup \Phi M_n$$

Причем под множеством  $\Phi M_j$  подразумевается комплексный ФМ, под которым понимается структурно максимально сложный модуль, имеющий наивысшие показатели качества:

$$\Phi M_j = (n_1, n_2, \dots, n_i),$$

где  $n_i$  – главные поверхности модуля.

Структурный состав частного модуля формируется методом адресации из комплексного ФМ.

Как показывает практика, повышение точности формы, размеров и допусков расположения поверхностей функциональных модулей детали в *субтрактивном производстве* должно осуществляться в течение определенного промежутка времени по всем основным элементам детали. Для этого сначала следует достигнуть одного уровня точности заготовки для основных поверхностей ФМ, затем начать их повторную обработку, стремясь к следующему уровню точности, и так до тех пор, пока не будут обеспечены требования точности, заданные чертежом детали. Причиной такого разделения технологического процесса изготовления детали на *этапы* служит невозможность с помощью однократной обработки всех поверхностей получить из заготовки 16-17 качества точности деталь 7-8 качества, наследование погрешности обработки и необходимость включения внестаночных операций (химикотермической обработки и нанесения покрытий). В зависимости от назначения внестаночных операций определяется их место в технологическом процессе и требования к обработке, предшествующей этим операциям.

Технологический процесс в субтрактивном производстве можно представить как последовательность этапов, которую можно отразить в виде *типовой схемы обработки*. Представленная в таблице 2 укрупненная типовая схема обработки является результатом анализа технологических регламентов изготовления корпусных деталей на станкостроительных предприятиях.

При механической обработке детали функциональный модуль претерпевает ряд изменений, связанных со снятием припусков и напусков на этапах обработки. Поэтому конструкторско-технологическая модель должна отражать сведения о ФМ на заготовительном (З), предварительном (П), чистовом (Ч) и отделочном (О) этапах технологического процесса:

$$\Phi M_j^3 = (n_1^3, n_2^3 \dots n_{i-1}^3, n_i^3); \quad \Phi M_j^П = (n_1^П, n_2^П \dots n_{i-1}^П, n_i^П);$$

$$\Phi M_j^Ч = (n_1^Ч, n_2^Ч \dots n_{i-1}^Ч, n_i^Ч); \quad \Phi M_j^О = (n_1^О, n_2^О \dots n_{i-1}^О, n_i^О).$$

Определение состояний  $\Phi M_j^3$ ,  $\Phi M_j^П$ ,  $\Phi M_j^Ч$ ,  $\Phi M_j^О$  и маршрута обработки модулей на этапах типовой схемы обработки предлагается осуществлять двумя способами:

1) с помощью стандартных маршрутов, применяемых на том или ином предприятии для ФМ различного служебного назначения;

2) с помощью синтеза возможных вариантов маршрута ФМ низкого ранга на основе моделирования состояния показателей его качества [88,95].

Таблица 2 – Типовая схема обработки чугунных корпусных деталей

Наименование этапа	Содержание этапа	IT	Ra
Заготовительный	Изготовление заготовки и ее подготовка к обработке	18–20	30–50
Предварительный	Удаление напусков и части припусков с основных и вспомогательных баз, крупных плоскостей и отверстий	13–14	12,5–6,3
Термический	Старение искусственное	15–16	12,5–6,3
Малярный 1	Грунтование исходных поверхностей	–	–
Чистовой 1	Обработка основных и вспомогательных баз, плоскостей, фасок и канавок для выхода инструмента	9–12	3,2–6,3
Чистовой 2	Обработка крепежных отверстий, мелких плоских поверхностей, пазов	9–11	3,2–1,25
Отделочный	Окончательная обработка конструкторских баз	5–8	0,63–1,25
Малярный 2	Нанесение лакокрасочных покрытий	–	–

Для формализации назначения маршрута по первому методу предлагается использовать понятие типового технологического маршрута обработки ФМ – совокупности упорядоченной технологической информации о ФМ:

$$ФМ_j \rightarrow ТМ_j = \{n_i^{нчо}, пер_{y,i}, Рu, Уn, Э\},$$

где  $n_i^{нчо}$  – совокупность обрабатываемых элементарных поверхностей;  $пер_{y,i}$  – переходы обработки и их точность;  $Рu$  – виды режущего инструмента и их размерные характеристики;  $Уn$  – фрагменты управляющей программы для станков с числовым программным управлением;  $Э$  – этап типовой схемы обработки в который распределяется переход.

### 3.1.2 Внутренние и внешние показатели функциональных модулей в задаче проектного базирования

Для структурирования информации о ФМ и создания условий для автоматизации процессов базирования предлагается их характеризовать показателями двух видов: внутренними и внешними. *Внутренние* определяют форму, размеры, взаимное расположение и показатели качества компонентов ФМ на этапе. *Внешние показатели* определяют ориентацию ФМ относительно других ФМ деталей. Внешними показателями ФМ являются размерные связи (линейные и угловые) рассматриваемого модуля с другими модулями. Обеспечение точности внешних показателей на стадии проектирования является основной задачей проектного базирования.

Хранение информации о *внутренних параметрах* ФМ внутри этапов типовой схемы обработки предлагается осуществлять в виде базы данных, формат которой можно представить в следующем виде:

$$\begin{array}{l}
 \Phi M_j^3 = (n_1^3, n_2^3 \dots n_{i-1}^3, n_i^3) \\
 \begin{array}{l}
 \downarrow \qquad \qquad \qquad \downarrow \qquad \qquad \qquad \downarrow \\
 \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \text{ПК}n_i^3 = \{Xp_i^3, \Phi n_i^3, Гбр_i^3, Кч_i^3, Дn_i^3, Оп_i^3\} \\
 \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \text{ПК}n_2^3 = \{Xp_2^3, \Phi n_2^3, Гбр_2^3, Кч_2^3, Дn_2^3, Оп_2^3\} \\
 \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \text{ПК}n_1^3 = \{Xp_1^3, \Phi n_1^3, Гбр_1^3, Кч_1^3, Дn_1^3, Оп_1^3\};
 \end{array} \\
 \\
 \Phi M_j^\Pi = (n_1^\Pi, n_2^\Pi \dots n_{i-1}^\Pi, n_i^\Pi) \\
 \begin{array}{l}
 \downarrow \qquad \qquad \qquad \downarrow \qquad \qquad \qquad \downarrow \\
 \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \text{ПК}n_1^\Pi = \{Xp_1^\Pi, \Phi n_1^\Pi, Гбр_1^\Pi, Кч_1^\Pi, Дn_1^\Pi, Оп_1^\Pi\} \\
 \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \text{ПК}n_2^\Pi = \{Xp_2^\Pi, \Phi n_2^\Pi, Гбр_2^\Pi, Кч_2^\Pi, Дn_2^\Pi, Оп_2^\Pi\} \\
 \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \text{ПК}n_i^\Pi = \{Xp_i^\Pi, \Phi n_i^\Pi, Гбр_i^\Pi, Кч_i^\Pi, Дn_i^\Pi, Оп_i^\Pi\};
 \end{array} \\
 \\
 \Phi M_j^Ч \dots\dots\dots;
 \end{array}$$

где  $Xp$  – характер поверхности (ось – О, плоскость – Р);  $\Phi n$  – функциональная принадлежность (функциональная, технологическая поверхность);  $Гбр$  – габарит поверхности (длина и ширина для плоской поверхности, диаметр и длина);  $Кч$  – качество (калитет IT и шероховатость Ra);  $Дn$  – доступность для обработки в координатном направлении;  $Ор$  – ориентация поверхности (координаты единичного вектора).

База данных может формироваться с помощью задания необходимых данных вручную или с помощью автоматических средств той или

иной САД-системы, в зависимости от возможностей параметризации модели.

Оперирование с *внешними параметрами* предлагается осуществлять с помощью неориентированных графов типа дерева линейных размерных связей (обозначений размерных связей) главных поверхностей ФМ в трех координатных направлениях  $R_{(x,y,z)}$  и ориентированного графа угловых расположений (обозначений угловых расположений)  $U$ .

Задачи внутримашинного представления информации предполагают использование матричного представления графов. Графы  $R_{(x,y,z)}$  предлагается представлять с помощью матрицы смежности  $R_{(x,y,z)}^{cm} = \|r_{i,j}\|_{m \times m}$ , элементы которой образуются по правилу:

$$r_{i,j} = \begin{cases} v_k, & \text{если вершина } \bar{n}_i \text{ соединена с вершиной } \bar{n}_j \text{ ребром;} \\ 0 & \text{в противном случае,} \end{cases}$$

где  $v_k = (\bar{n}_i, \bar{n}_j)$  – ребро графа, соединяющее вершины  $\bar{n}_i$  и  $\bar{n}_j$  (в матрицу записывается  $A(T)$  – соответствующий линейный размер и численное значение допуска на него;  $m$  – число вершин).

В рассмотренном графе множество ребер является неориентированными линиями, для которых не существует порядок соединения вершин  $v_k = (\bar{n}_i, \bar{n}_j)$  или  $v_k = (\bar{n}_j, \bar{n}_i)$

Таким образом, в общем виде матрица смежности поверхностей имеет вид:

$$R_{(x,y,z)}^{cm} = \begin{array}{c} \bar{n}_1 \\ \bar{n}_2 \\ \dots \\ \bar{n}_i \\ \bar{n}_m \end{array} \left| \begin{array}{cccccc} \bar{n}_1 & \bar{n}_2 & \dots & \bar{n}_j & \bar{n}_m \\ 0 & A_{12} & \dots & 0 & A_{1m} \\ A_{21} & 0 & \dots & 0 & A_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ A_{i1} & A_{i2} & \dots & A_{ij} & A_{im} \\ A_{m1} & A_{m2} & \dots & A_{mj} & 0 \end{array} \right|$$

Строки и столбцы матрицы  $R_{(x,y,z)}^{cm}$  соответствуют вершинам графа. На пересечении  $i$ -й строки и  $j$ -го столбца ставится элемент  $r_{i,j}$ , соответствующий размеру и численному значению допуска на размер или ставится 0. Также ребрам присваиваются метки 1 или 2. Метка 1 присваивается элементу матрицы в том случае, если между собой соединяются обрабатываемые вершины. Метка 2 присваивается элементу матрицы в том случае, если между собой соединяются вершины, обознача-

ющие необрабатываемые поверхности, и если ребро соединяет вершины, обозначающие обрабатываемую и необрабатываемую поверхности.

Эффективная работа системы возможна только при корректном вводе исходной конструкторской информации, в том числе и размерных связей. Для оценки правильности простановки линейных размеров с помощью матриц смежности предлагается проверять следующие условия:

1. Число вершин на графе должно быть на 1 больше числа ребер, т. е. должно выполняться условие  $KI/2 = m - 1$ , где  $KI$  – сумма строк и столбцов не равных 0. Если  $KI/2 < m - 1$ , то на чертеже недостаточно линейных размеров. Если  $KI/2 > m - 1$ , то на чертеже  $KI/2 - m + 1$  лишние размеры.

2. На графе не должно быть оторванных вершин, т. е. в матрице не должно быть нулевой строки (столбца).

3. На графе должна быть одна линейная связь между комплексом обрабатываемых и необрабатываемых поверхностей, т. е. строки (столбцы) матрицы, соответствующие номерам обрабатываемых вершин, должны иметь единственный элемент с меткой «2», а необрабатываемые с меткой «1».

4. На графе не должно быть замкнутых контуров. Для проверки этого условия в строке (столбце) матрицы отыскиваются единственные ненулевые элементы. Далее эти строки (столбцы) обнуляются (в графе отсекаются вершины). В результате получается трансформированная матрица, в которой соответствующие элементы строк (столбцов) нулевые. В новой матрице вновь выполняется обнуление конечных ветвей и т. д. Поиск прекращается при получении на двух последних шагах двух одинаковых матриц.

В ходе проведения исследований было установлено, что для деталей имеющих общую плоскость симметрии и ряд ФМ вращения (в том числе и соосных, оси которых лежат в этой плоскости) отсутствуют формальные правила построения графов линейных размеров. Предлагается указанные графы строить в следующей последовательности:

1. В необходимом координатном направлении вначале отыскивается базовый ФМ, и с ним связывается плоскость симметрии комплекса необрабатываемых элементов конструкции, затем эта процедура повторяется для комплекса обрабатываемых элементов. Для этого устанавливается факт задания допуска симметричности или соосности.

1.1. Если на чертеже детали имеются конструктивные элементы, для которых допуски симметричности или соосности (как правило, комплекс обрабатываемых поверхностей) заданы в явном виде, то за базовый элемент для всех прочих элементов принимается поверхность элемента, для которого указанный допуск задан в явном виде (все прочие поверхности на графе соединяются ребром с базовым элементом);

1.2. Если на чертеже детали допуски симметричности заданы по умолчанию, то за базовый элемент, к которому относится неуказанный допуск симметричности, нужно принимать плоскость (ось) симметрии элемента имеющего большую длину в плоскости параллельной плоскости симметрии; при одинаковых длинах – плоскость (ось) элемента с допуском линейного размера по более точному качеству в направлении перпендикулярном плоскости симметрии; при одинаковых длинах и качествах – элемента с большим линейным размером в направлении, перпендикулярном плоскости симметрии. Если и размеры одинаковы, то по технологическим соображениям предпочтение следует отдавать поверхности вращения;

1.3. В том случае, если имеются соосные поверхности, а допуск соосности для них не задан, то за базовый элемент принимается ось поверхности, имеющей наибольшую длину; при одинаковых длинах – ось поверхности с допуском диаметра по более точному качеству; при одинаковых длинах и качествах – ось поверхности с большим диаметром.

2. Базовые элементы комплексов обрабатываемых и необрабатываемых поверхностей связываются ребром графа, и отыскивается численное значение допуска симметричности (соосности) в зависимости от номинального размера и определяющего допуска размера.

Графы  $U$  предлагается формировать согласно принципам однозначности и корректности задания ориентации элементов конструкции относительно того или иного состава баз ориентации, а также исходя из следующих основных положений:

- за базу, к которой относится неуказанный допуск перпендикулярности в одном координатном направлении, принимается элемент (или его ось) из числа обрабатываемых или необрабатываемых конструктивных элементов (в зависимости от того какой граф формируется), имеющий больший линейный размер в рассматриваемых перпендикулярных направлениях, а при одинаковых размерах – поверхность, имеющая меньшую шероховатость;

- если деталь имеет элементы, для которых указаны допуски перпендикулярности, то неуказанные допуски следует относить к тем же базам, что и указанные;

- главная плоскость ФМ может ориентироваться в координатных направлениях относительно: двух явных плоскостей; явной плоскости и плоскости симметрии; оси и скрытой плоскости, проходящей через ось (в частности плоскости симметрии); плоскости, проходящей через оси двух отверстий и другой плоскости;

- главная ось ФМ может ориентироваться в координатных направлениях относительно следующих компонентов комплекта баз: явной плоскости; оси и плоскости, связанной с осью (в частности к плоскости симметрии); плоскости, проходящей через оси двух отвер-

стей (в частности плоскости симметрии); плоскости симметрии плоских элементов;

– численные значения неуказанных допусков определяются по ГОСТ 30893.2-2002 (ИСО 2768-2-89).

Графы  $U$  предлагается представлять в виде матрицы инцидентности. Под матрицей инцидентности понимается прямоугольная таблица вида  $U = \|u_{i,j}\|_{m \times l}$ , элементы которой образуются по правилу:

$$u_{i,j} = \begin{cases} y_l, & \text{если ребро } y_l \text{ выходит из вершины } \bar{n}_m; \\ -y_l, & \text{если ребро } y_l \text{ входит в вершину } \bar{n}_m; \\ 0 & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

где  $y_l = \langle \bar{n}_i, \bar{n}_j \rangle$  дуга графа, соединяющая вершину  $i$  с вершиной  $j$  (в матрицу записывается  $T$  – соответствующий допуск углового расположения);  $m$  – число вершин;  $l$  – число ребер.

Следует отметить, что  $y_l = \langle \bar{n}_i, \bar{n}_j \rangle$  и  $y_l = \langle \bar{n}_j, \bar{n}_i \rangle$  – это различные дуги в графе  $U$ .

Для формального автоматического формирования матриц инцидентности предлагается использовать понятие единичного вектора плоскости или оси. Под единичным вектором плоскости будем понимать любой вектор единичной длины, перпендикулярный рассматриваемой плоскости и имеющий начало в нулевой точке отсчета системы координат. Под единичным вектором прямой будем понимать любой вектор единичной длины, параллельный рассматриваемой оси и имеющий начало в нулевой точке отсчета системы координат. Если определить координаты единичного вектора уравнения главной плоскости ФМ, проходящей через данную точку с заданным нормальным вектором, и единичного вектора уравнения прямой ФМ в каноническом виде, то можно определять показатели взаимного углового расположения любых пар поверхностей внутри функционального модуля и детали в целом (рис. 14).

Угловую ориентацию ФМ относительно глобальной системы координат всей детали предлагается характеризовать углами поворота осей локальной системы координат ФМ относительно глобальной. Номинально оси локальной системы координат имеют одинаковое направление с осями глобальной системы. При повороте осей локальной системы координат относительно глобальной, значения ориентации единичных векторов можно легко пересчитать. Поворот оси локальной системы координат считается положительным, если осуществляется против часовой стрелки.

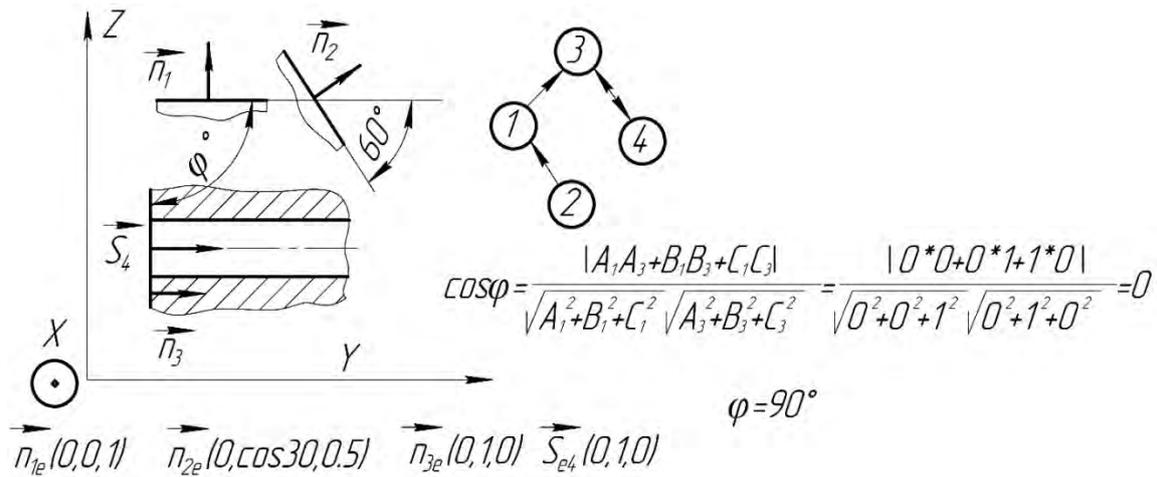


Рисунок 14 – Схема иллюстрации формального определения ориентации поверхностей

### 3.1.3 Синтез модели объекта производства

При построении модели заготовки в субтрактивном производстве необходимо учитывать, что каждый предыдущий этап типовой схемы обработки заготовки является подготовительным для последующего. Для построения модели вначале необходимо сформировать модели  $\Phi M_j^{\Pi}; \Phi M_j^{\text{Ч}}; \Phi M_j^{\text{О}}$  и детали  $KД_j^{\Pi}; KД_j^{\text{Ч}}; KД_j^{\text{О}}$ . Далее задаются внутренние показатели  $ПКn_i^{\Pi}; ПКn_i^{\text{Ч}}; ПКn_i^{\text{О}}$ . После чего формируются графы  $R^{\Pi}(x,y,z); R^{\text{Ч}}(x,y,z); R^{\text{О}}(x,y,z)$  и  $U_{n_i^{\text{обр-нобр}}}^{\Pi}; U_{n_i^{\text{обр-нобр}}}^{\text{Ч}}; U_{n_i^{\text{обр-нобр}}}^{\text{О}}; U_{n_i^{\text{обр-обр}}}^{\Pi}; U_{n_i^{\text{обр-обр}}}^{\text{Ч}}; U_{n_i^{\text{обр-обр}}}^{\text{О}}$ , где *обр-нобр* – индекс, обозначающий отношение между обрабатываемыми и необрабатываемыми поверхностями; *обр-обр* – между обрабатываемыми поверхностями (рис. 15).

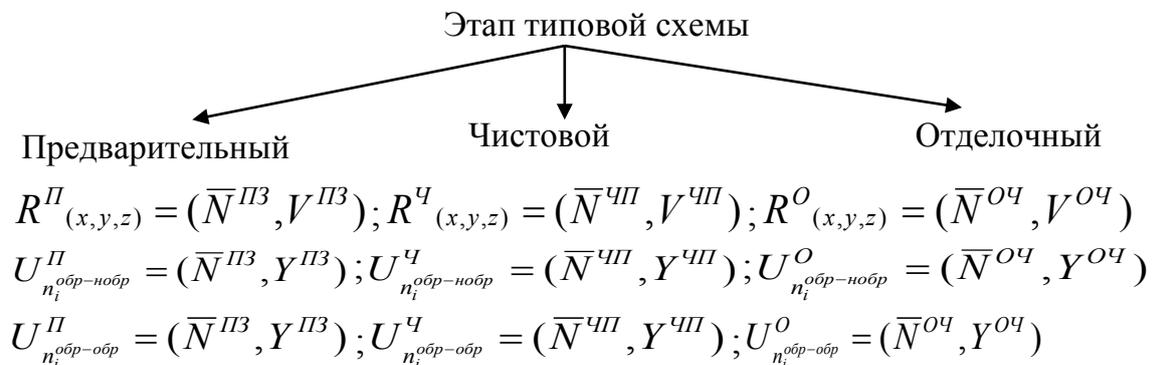


Рисунок 15 – Состав графов для различных этапов

Графы на этапах формируются по обозначениям размерных связей и допусков расположения с чертежа детали. Тем самым обеспечивается *принцип единства конструкторских и технологических баз*.

Линейные и угловые связи ориентируют поверхности, как рассматриваемого этапа, так и поверхности предыдущего этапа, то есть поверхности, получаемые после завершения этапа, и поверхности, удаляемые на этапе. Поверхности, удаляемые на этапе, могут являться базами для обработки. Поэтому поверхностям присваиваются индексы этапов. Так, для предварительного этапа это индексы *П* и *З*, чистового – *Ч* и *П*, отделочного – *О* и *Ч*.  $\bar{N}^{ПЗ}$ ,  $\bar{N}^{ЧП}$ ,  $\bar{N}^{ОЧ}$  – это *шесть* различных поверхностей (по две на каждом этапе). Под необрабатываемой поверхностью понимается поверхность, формообразование которой завершилось на предыдущем этапе изготовления.

Для удобства базирования заготовок в неавтоматизированном режиме рекомендуется построить геометрическую модель заготовки (см. главу 2).

Поскольку в процессе *аддитивного синтеза* технологический процесс не делится на этапы, то для построения модели необходимо использовать графы чертежа детали или исходной заготовки.

## **3.2 Проектное базирование в субтрактивном производстве**

### **3.2.1 Методическое и алгоритмическое обеспечение проектного базирования в субтрактивном производстве**

Изложенные выше термины и определения позволяют предложить следующую последовательность процедур построения моделей базирования сопряжением для обеспечения заданных чертежом допусков расположения и размеров:

- 1) построение ГМЗ на этапах типовой схемы обработки;
- 2) определение составов баз ориентации и формирование структуры операции;
- 3) идентификация состава баз ориентации;
- 4) определение приоритета в обеспечении допуска расположения на операции;
- 5) синтез схемы базирования;
- 6) синтез схемы установки и операционного эскиза;
- 7) синтез функциональной модели приспособления (список основных, вспомогательных и дополнительных функций);
- 8) определение характеристик окружающей среды (элементы станка для использования приспособление);
- 9) анализ допустимости выбранной схемы установки (оценка погрешности схемы установки);

10) разработка конструктивной схемы (компоновки) приспособления;

11) параметрический синтез приспособления (силовой расчет и расчет на точность);

12) разработка рабочих чертежей приспособления.

При переходе от первой процедуры проектирования к последней происходит наращивание объема информации о процессе реального базирования. Однако никогда модель базирования не может быть тождественна реальному процессу, да это и не требуется.

Процедуры 1–6 играют особую роль в процессе проектирования технологического процесса и приспособления. Именно с их помощью на стадии проектирования решаются задачи обеспечения заданных чертежом требований к точности допусков расположения элементов конструкции. После их реализации формируется задание на выбор стандартного или проектирование специального станочного приспособления (или состава установочных элементов и ориентации заготовки при установке на стол станка).

Процедуры 7–12 реализуются при проектировании нового станочного приспособления и являются хорошо формализованными и алгоритмизированными и в настоящей монографии не рассматриваются.

Исходными данными для проектирования является чертеж детали (рис. 16).

**Процедура 1.** Для построения ГМЗ на этапе или операции (рис. 17, 18) обработки необходимо:

– построить контурное изображение (или трехмерную модель) ГМЗ на этапе (операции);

– произвести нумерацию поверхностей;

– разделить все поверхности на обрабатываемые на этапе (операции) и те, формообразование (обработка) которых было завершено на предыдущем этапе (операции) и произвести их выделение различной толщиной линий (цветом);

– произвести *обозначение размерных связей и допусков расположения* обрабатываемых на рассматриваемом этапе (операции) и сформированных (обработанных) на предыдущем этапе (операции) поверхностей;

– построить графы обозначений линейных размерных связей  $R_{(x,y,z)}$  и графы обозначений угловых расположений  $U$  обрабатываемых поверхностей к обрабатываемым и обрабатываемых поверхностей к необрабатываемым.

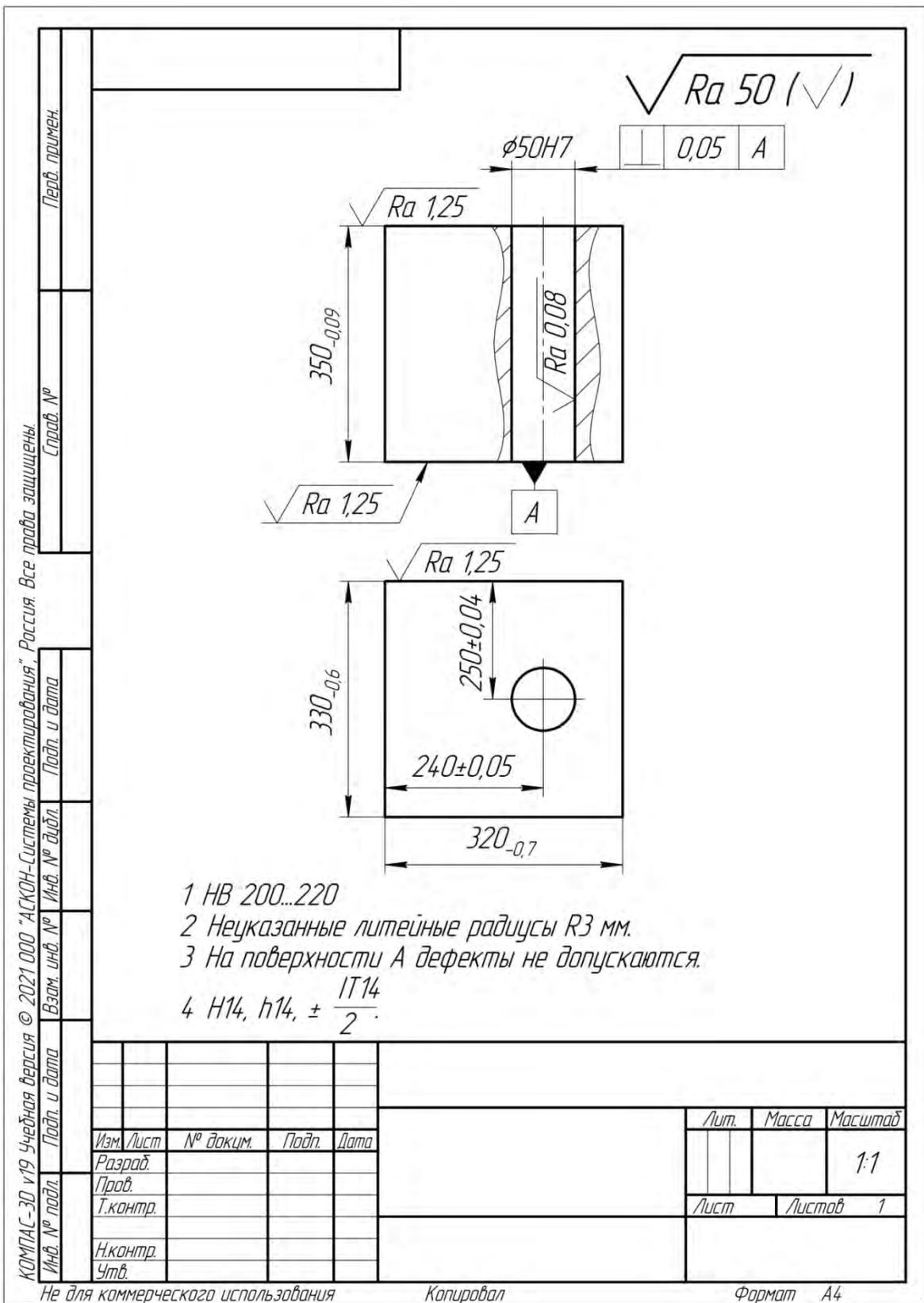


Рисунок 16 – Пример чертежа детали

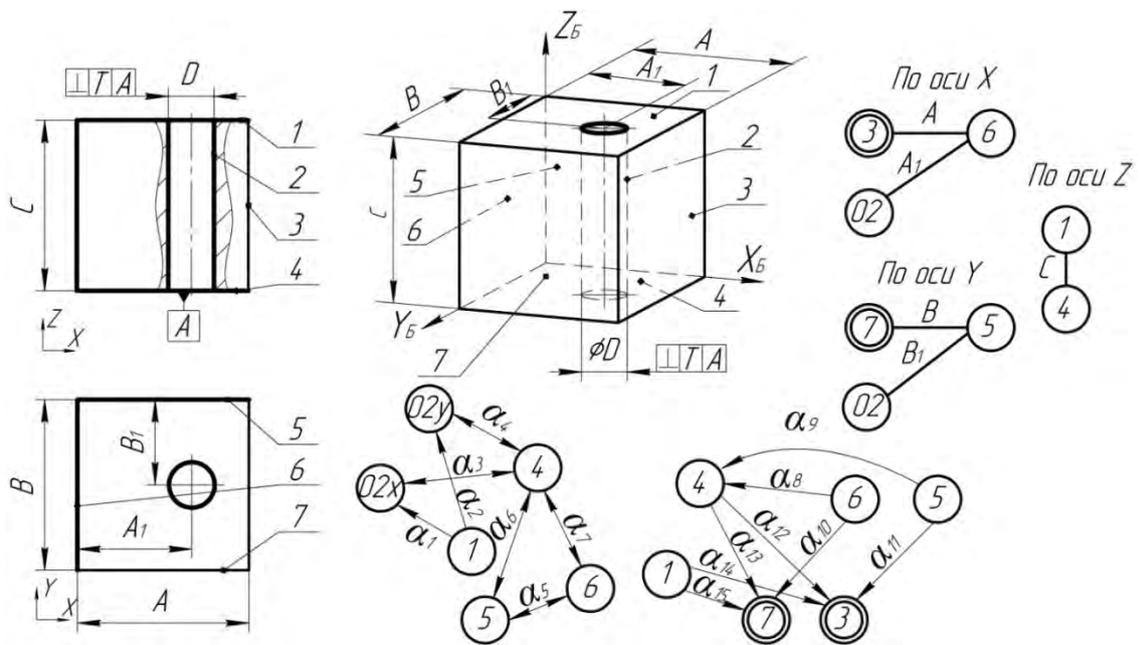


Рисунок 17 – ГМЗ на предварительном этапе обработки

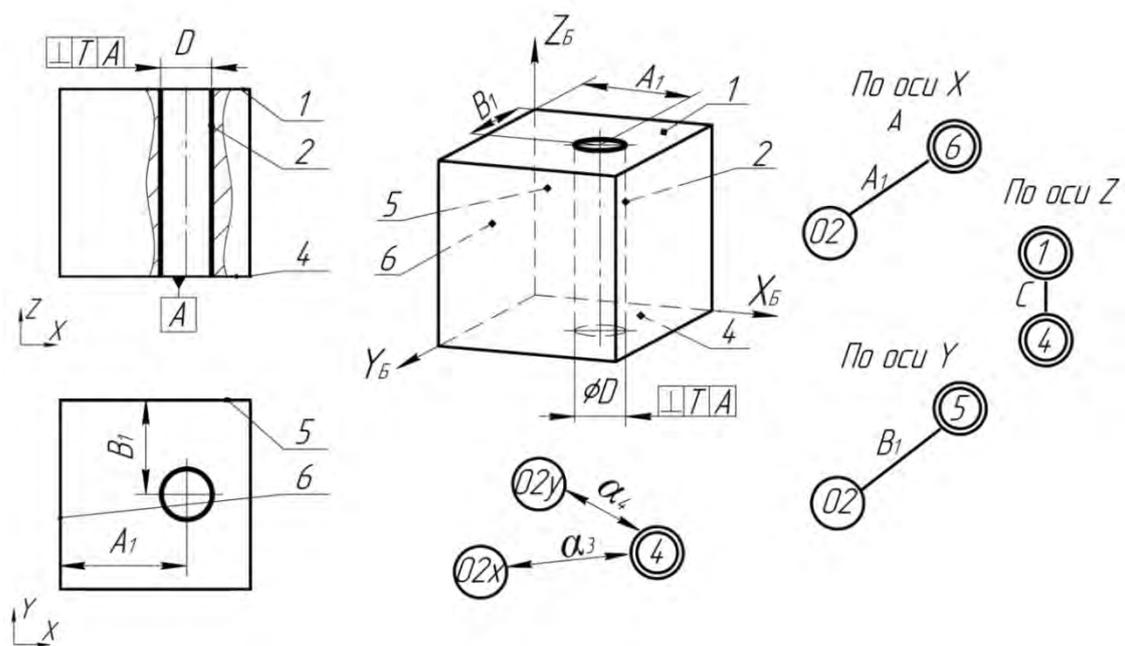


Рисунок 18 – ГМЗ на операции обработки отверстия

**Процедура 2.** Совместный анализ графов позволяет определить возможные *составы баз ориентации*. Анализ для главных осей (O) осуществляется согласно алгоритму:

$$\begin{aligned} \bar{n}_i(O) &\rightarrow (R_X \wedge R_Y) \vee (R_Y \wedge R_Z) \vee (R_X \wedge R_Z); \\ \{v_{iX} = (\bar{n}_i, \bar{n}_j)_X\} \wedge \{v_{iY} = (\bar{n}_i, \bar{n}_p)_Y\} &\Rightarrow \bar{n}_j - \bar{n}_p; \\ \{v_{iX} = (\bar{n}_i, \bar{n}_j)_X\} \wedge \{v_{iZ} = (\bar{n}_i, \bar{n}_p)_Z\} &\Rightarrow \bar{n}_j - \bar{n}_p; \end{aligned}$$

$$\{v_{iY} = (\bar{n}_i, \bar{n}_j)_Y\} \wedge \{v_{iZ} = (\bar{n}_i, \bar{n}_p)_Z\} \Rightarrow \bar{n}_j - \bar{n}_p;$$

$$\bar{n}_i(O) \rightarrow U_{n_i^{обр-нобр}} \vee U_{n_i^{обр-обр}} \rightarrow y_i = \langle \bar{n}_i, \bar{n}_l \rangle \Rightarrow \bar{n}_j - \bar{n}_p - \bar{n}_l.$$

Анализ для главных плоскостей (P) главных осей (O) осуществляется согласно алгоритму:

$$\bar{n}_i(P) \rightarrow R_X \vee R_Y \vee R_Z;$$

$$\{v_{iX} = (\bar{n}_i, \bar{n}_j)_X\} \Rightarrow \bar{n}_j \vee$$

$$\{v_{iY} = (\bar{n}_i, \bar{n}_j)_Y\} \Rightarrow \bar{n}_j \vee \{v_{iX} = (\bar{n}_i, \bar{n}_j)_X\} \Rightarrow \bar{n}_j;$$

$$\bar{n}_i(P) \rightarrow U_{n_i^{обр-нобр}} \vee U_{n_i^{обр-обр}} \rightarrow$$

$$\{y_i = \langle \bar{n}_i, \bar{n}_p \rangle\} \wedge \{y_i = \langle \bar{n}_i, \bar{n}_l \rangle\} \Rightarrow \bar{n}_j - \bar{n}_p - \bar{n}_l.$$

То есть, номер обрабатываемой поверхности (или оси обрабатываемой поверхности) отыскивается на графе (по одной оси для плоской поверхности, по двум координатным осям для оси) линейных размерных связей. Определяется связь или связи с другими ближайшими поверхностями на графах размерных связей (кратчайшие пути на графе от рассматриваемой поверхности до других поверхностей). Далее для плоских поверхностей на графах угловых расположений обрабатываемых поверхностей состав дополняется двумя поверхностями, для оси состав дополняется одной поверхностью. На рисунке 19 показана иллюстрация работы алгоритма формирования комплекта баз для поверхности вращения (оси), а на рисунке 20 – для плоскости.

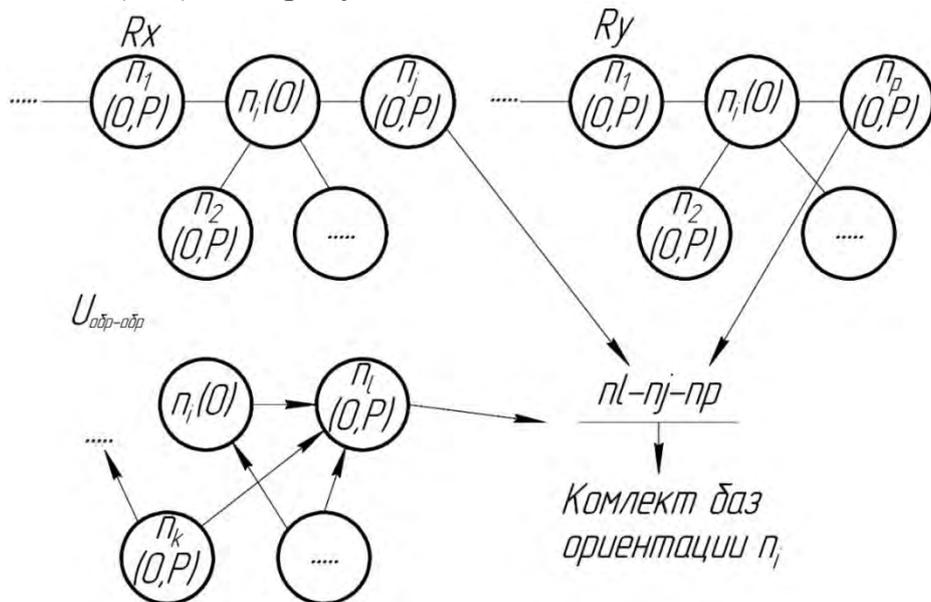


Рисунок 19 – Схема работы алгоритма определения состава баз ориентации для поверхности вращения (оси)

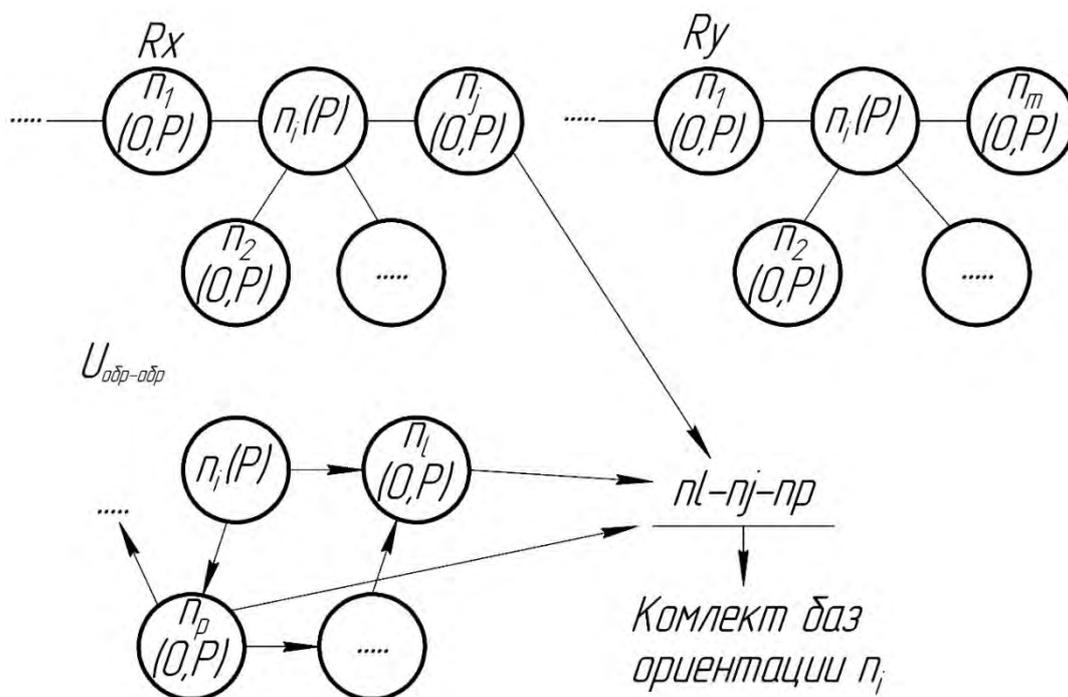


Рисунок 20 – Схема работы алгоритма определения состава баз ориентации для плоскости

Так, для плоскости 1 модели заготовки на предварительном этапе (рис. 17) из графа линейных связей по  $Z$  отбирается поверхность 4, а с помощью графа угловых расположений состав формируется с помощью поверхностей 3 и 7. Для оси  $o_2$  из графов линейных связей по  $X$  и  $Y$  отбираются поверхности 5 и 6, а с помощью графа угловых расположений состав формируется с помощью поверхности 4. В таблице 3 представлены составы баз ориентации для ГМЗ на предварительном этапе, представленной на рисунке 17.

Таблица 3 – Составы баз ориентации для рассматриваемой детали на предварительном этапе обработки

1	$o_2$	4	5	6
4-3-7 4- $o_{2x}$ - $o_{2y}$	5-6-4	1- $o_{2x}$ - $o_{2y}$ 1-5-6 1-3-7	$o_{2y}$ -4-6 7-4-6 $o_{2y}$ -4-3 7-4-3	$o_{2x}$ -4-5 3-4-5 $o_{2x}$ -4-7 3-4-7

Анализ составов баз ориентации для различных поверхностей и их трансформация по мере формирования операций дает возможность сформировать маршрут обработки и структуры операций. При анализе необходимо учитывать:

– аналогичность составов для обработки различных поверхностей (например, для поверхностей 1, 5 и 6 идентичные составы 3-4-7);

– возможность использования настроечной базы (при замене поверхности состава на предполагаемую в качестве настроечной должен сформироваться аналогичный состав; например, при замене поверхности 1 в составе 1-5-6 на поверхность 4 формируется состав 5-6-4, аналогичный составу поверхности o2. При замене поверхности o2<sub>x</sub> в составе o2<sub>x</sub>-4-5 на поверхность 6 формируется состав 6-4-5, аналогичный составу поверхности o2;

– особенности выбора баз на первой операции (для решения задачи обеспечения требуемого взаимного расположения обрабатываемых и необрабатываемых поверхностей в качестве базы на первой операции выбираются составы из максимального числа необрабатываемых поверхностей (на графах выделены двойным кружком, на ГМЗ – тонкими линиями, а в составах – нежирными цифрами);

– технологические возможности станка (выполняемые переходы, вектор доступности для обработки и др.).

В формализованном виде процедуру формирования маршрута обработки и операций можно представить в виде последовательности шагов.

*Шаг 1.* Распределение переходов по типоразмерам станков. Формирование массива выбора оборудования.

На рисунке 21 показан алгоритм распределения переходов по типоразмерам станков. Характеристика очередного перехода (*b*) формируется в блоке 2 для сравнения с возможностями *j*-го станка (блок 3). Если габариты заготовки (*a*) меньше или равны габаритам рабочей зоны станка (*e*) (блок 4), в массиве переходов *j*-го станка есть соответствующий переход (*d*) (блок 5) и данный станок уже ранее был отобран для другого перехода (блок 9), то в таблицу выбора оборудования (табл. 4) записываются *составы баз ориентации* для обработки поверхности (блок 10) и рассматривается следующий станок. Если *j*-й станок ранее не отбирался (блок 9), то ему присваивается очередной номер *q*, который заносится в таблицу 4.

Так, для *i*-го перехода рассматриваются все станки из массива (блоки 6, 13). Если для выполнения данного перехода нет соответствующего оборудования (блок 7), то этот переход записывается в отдельный список для принятия альтернативного решения (блок 12). Альтернативным решением может быть: приобретение необходимого оборудования, модернизация одного из имеющихся станков, замена данного перехода другим.

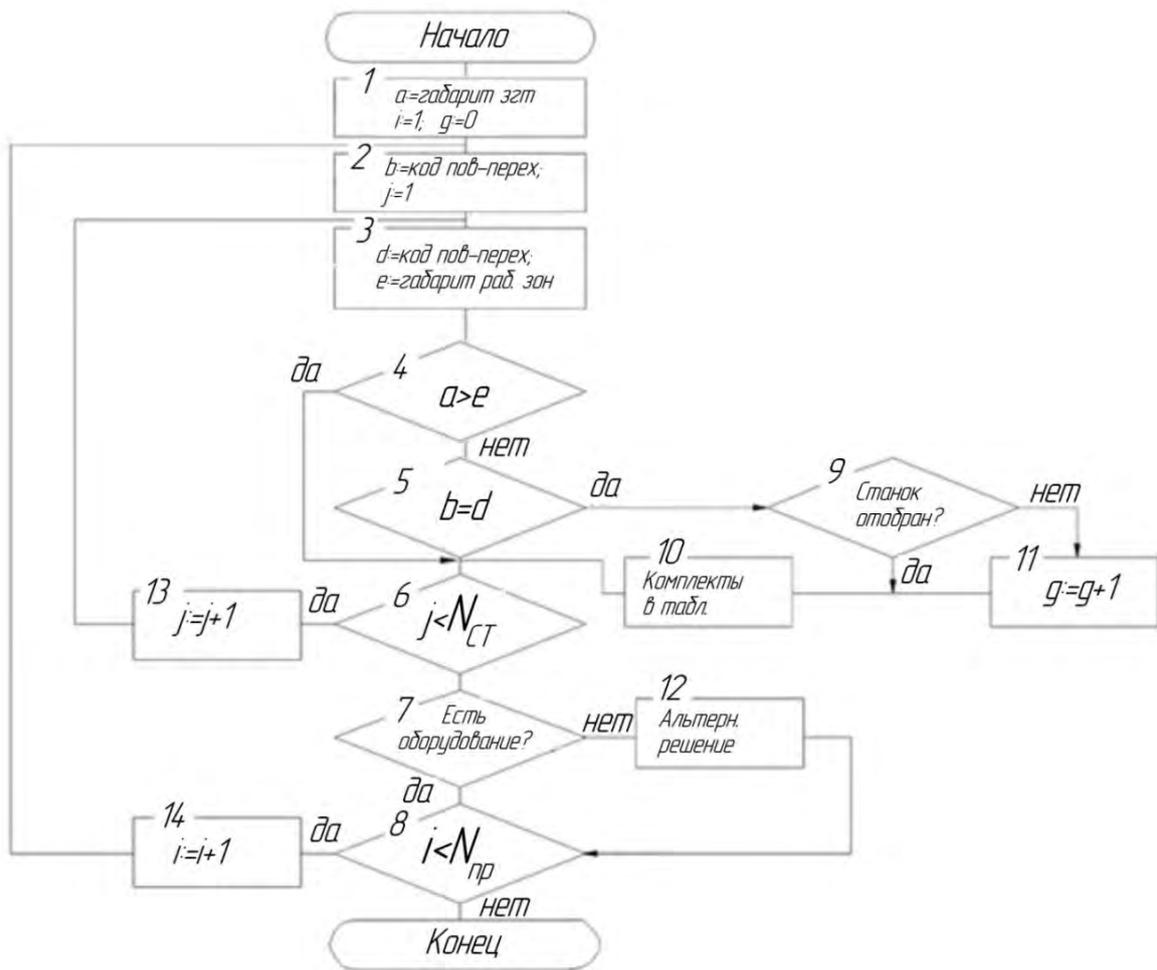


Рисунок 21 – Блок-схема распределения переходов по типоразмерам станков:

$i$  – порядковый номер перехода в этапе;  $N_{пр}$  – количество переходов в этапе;  $j$  – номер станка в массиве;  $N_{ст}$  – количество станков в массиве;  $q$  – номер отобранного станка

Таблица 4 – Формат таблицы выбора оборудования

Поверх- ность- переход $i$	Номер станка $q$			
	1	2	$q$	$N_{ст}$
1	$nl_{11}-nj_{11}-np_{11}$	$nl_{11}-nj_{11}-np_{11}$	...	...
2	$nl_{21}-nj_{21}-np_{21}$	$nl_{21}-nj_{21}-np_{21}$	...	...
$i$	$nl_{i1}-nj_{i1}-np_{i1}$	$nl_{i1}-nj_{i1}-np_{i1}$	...	...
$N_{пр}$	...	...	...	...

*Шаг 2. Выбор комплекта баз и станка для обработки на первой операции этапа.*

Правильный выбор баз на первой операции этапа позволяет обеспечить заданное чертежом относительное расположение обрабатываемых и исходных поверхностей этапа, а также обеспечить равномерность снятия припуска на поверхности.

Для решения задачи обеспечения равномерности припуска в качестве комплекта баз на первой операции этапа принимаются именно те поверхности, на которых необходимо обеспечить равномерное распределение припуска. Для решения задачи обеспечения заданного относительного расположения обрабатываемых и исходных поверхностей комплект баз на первой операции этапа должен состоять из поверхностей, обработанных на предыдущем этапе (или необрабатываемых вовсе для первой операции обработки) и необрабатываемых на данном этапе.

Для формального решения задачи определения комплектов баз на первой операции и выбора станка в столбцах таблицы выбора оборудования отыскиваются ячейки с идентичными комплектами, состоящими из исходных (необрабатываемых) поверхностей этапов. За решение принимается столбец (станок), в котором наибольшее количество ячеек (переходов) с идентичными комплектами.

Переходы с одинаковыми типоразмерами станков и технологических баз объединяются в группу, предварительно формируя тем самым первую операцию этапа.

Если для модели этапа нет комплектов, состоящих только из исходных поверхностей, то принимается комплект, состоящий из максимального их количества.

Если исходных (необрабатываемых) поверхностей на этапе нет, то в качестве комплекта баз на первой операции этапа следует использовать комплект для выполнения максимального количества переходов.

Если на поверхности при обработке необходимо равномерно распределить припуск (например, если поверхность подверглась цементации), то именно поверхности, на которых это надо сделать, должны входить в комплект баз на первой операции.

При определении комплектов баз необходимо определять поверхности, которые можно обработать от *настроечных* баз. Формально, это такие обрабатываемые поверхности в столбце «поверхность-переход» таблицы выбора оборудования, для которых имеется комплект баз, отличающийся одним (для плоской или двумя для оси) компонентом от комплекта другой поверхности и при подстановке этой поверхности в собственный комплект получается комплект баз, идентичный другому комплекту. Настроечной базой будет являться замененная поверхность.

*Шаг 3. Анализ возможности совмещения и последовательности выполнения переходов, отобранных для данного типоразмера станка.*

Анализ заключается в:

а) сравнении векторов доступности обрабатываемых функциональных модулей и координат доступности формообразующих элементов в пространстве рабочей зоны (т. е. анализ технологических возможностей станка с учетом оснащенности поворотным столом);

б) проверке наличия необходимого количества гнезд в револьверной головке или магазине станка;

в) ограничении по последовательности обработки (см. рекомендации ниже).

Если установлено, что несколько переходов нельзя выполнить при использовании одного комплекта баз или за один установ, то в таких случаях уменьшается число переходов в операции вплоть до одного. Также предусматривается возможность рекомендации применения комбинированного инструмента.

*Шаг 4. Выбор станка и комплекта баз для второй операции.*

Для этого в столбцах «отсеченной» таблицы выбора оборудования отыскивается максимальное количество ячеек (поверхностей-переходов) с идентичными комплектами, состоящими из обработанных на предыдущих операциях поверхностей. Проверяется возможность использования настроечных баз.

«Отсеченная» таблица получается отбрасыванием от предыдущей таблицы строк, соответствующих обработанным поверхностям.

Переходы с одинаковыми типоразмерами станков и технологических баз объединяются в группу, формируя тем самым вторую операцию.

Если внутри этапа нельзя определить комплект технологических баз для обработки той или иной поверхности, состоящий только из обработанных на первой операции поверхностей, то используется комплект с максимальным их количеством.

Повторить шаг 3.

*Шаг 5. Выбор станка и комплекта баз для последующих операций.*

Повторяется шаг 4.

В результате работы методик формируется несколько вариантов маршрута обработки (табл. 5) с различными структурами операций. Окончательный выбор варианта последовательности обработки, содержания и структур, входящих в технологический процесс операций, можно осуществить на основе результатов технико-экономических расчетов.

Таблица 5 – Структура выходных параметров работы алгоритма

Обрабатываемые поверхности	i i-1 i-3	i-2 i-4	i+1 i+2	...
Комплект баз	$nl_{i1}-nj_{i1}-np_{i1}$	$nl_{i-13}-nj_{i-13}-np_{i-13}$	$nl_{i+12}-nj_{i+12}-np_{i+12}$	...
Станок	q	q+1	q-1	...

**Процедура 3.** Для идентификации состава баз ориентации рассматриваются поверхности сформированных ранее составов баз ориентации, и определяется характер поверхности.

Всего возможно четыре варианта сочетаний поверхностей (рис. 22). Далее определяется принадлежность рассматриваемого состава к одному из четырех описанных выше. Состав О-О-О практически не используется.

Так для поверхности 1 сформированы составы 4-3-7 – три взаимно перпендикулярные плоскости (состав № 1) и 4-02<sub>x</sub>-02<sub>y</sub> – три плоскости, две из которых проходят через ось (иначе две плоскости и ось (состав № 2)). Для поверхности 02 сформирован состав 5-6-4 – три взаимно перпендикулярные плоскости (состав № 1) и т. д.

**Процедура 4.** Определение приоритета в обеспечении допуска расположения на операции осуществляется ранжированием численных значений допусков по компонентам состава баз, приведением к одной базовой длине (определение удельного допуска) и последующего определения главной базы (в зависимости от этого значения).

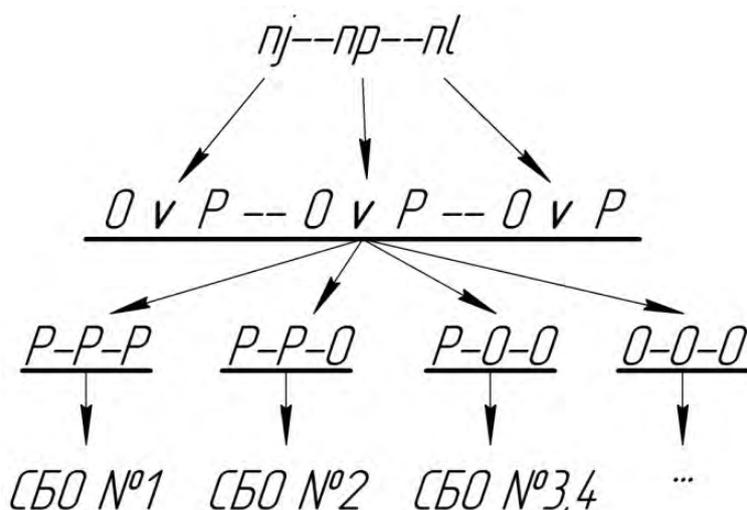


Рисунок 22 – Модель идентификации состава баз

Например, если относительно состава баз, состоящего из трех взаимно перпендикулярных плоскостей, ориентируется две оси и численное значение удельного допуска перпендикулярности одной оси относительно одной плоскости меньше численного значения допуска перпендикулярности второй оси относительно второй плоскости, то первая плоскость назначается главной базой (налагающей наибольшее число связей). Допуск расположения должен быть обеспечен относительно главной базы.

Для рассматриваемой заготовки поверхность 02 ориентируется относительно состава баз ориентации 5-6-4 с помощью двух линейных размеров и допуска перпендикулярности. В соответствии с ГОСТ 24643

допуск расположения не должен превышать доли допуска (25–60 %) на размер. Поэтому при обработке поверхности о2 приоритетным является допуск перпендикулярности поверхности о2 относительно поверхности 4.

Для рассматриваемого примера в случае одновременной обработки от состава 4-3-7 поверхностей 5 и 6 приоритетным является допуск перпендикулярности поверхностей 5 и 6 (заданный по умолчанию согласно ГОСТ 25069) относительно поверхности 4 (табл. 6).

Для поверхности о2 приоритетным является обеспечение допуска перпендикулярности.

Таблица 6 – Определение удельных допусков

Поверхности	Состав баз	Допуск		Длина	Удельный допуск (на длине 1000 мм)
		Наименование	Значение		
6	4	⊥	0,4	350	<b>1,143</b>
	7	⊥	0,6	330	1,818
	3	Размер	0,7	350	2,000
5	4	⊥	0,4	350	<b>1,143</b>
	3	⊥	0,6	320	1,875
	7	Размер	0,6	350	1,714

**Процедура 5.** Для определения числа налагаемых связей следует пользоваться следующими утверждениями.

*Утверждение 1.* Схема базирования в первую очередь должна обеспечить заданную точность допуска расположения, а затем точность размеров (расстояний). Если не обеспечена требуемая точность допуска расположения, то деталь неизбежно перейдет в неустранимый брак, линейные размеры можно компенсировать.

*Утверждение 2.* Технологическими базами могут быть назначены только те компоненты геометрической модели заготовки, от которых заданы расстояния (размеры) до обработанных поверхностей и по отношению к которым заданы показатели расположения (перпендикулярности, параллельности, угла) обработанной поверхности. Несоблюдение этого требования приведет к появлению погрешности схемы базирования.

*Утверждение 3.* Точность взаимного (углового) расположения обеспечивают только тройная однонаправленная (установочная), двойная однонаправленная (направляющая) и четверная (двойная направляющая) базы, а также сочетания двойной разнонаправленной (двойной опорной) и одиночной (опорной) баз и тройной разнонаправленной (тройной опорной) и одиночной (опорной) баз.

Например, на рисунке 23 а поверхность, к которой указан допуск перпендикулярности обрабатываемой плоскости, взята в качестве одиночной (опорной) базы. Одиночная (опорная) база определяет точку, относительно которой невозможно определить угловое положение плоскости. Тройная однонаправленная (установочная) база определяет плоскость. Тем самым обеспечивается допуск расположения.

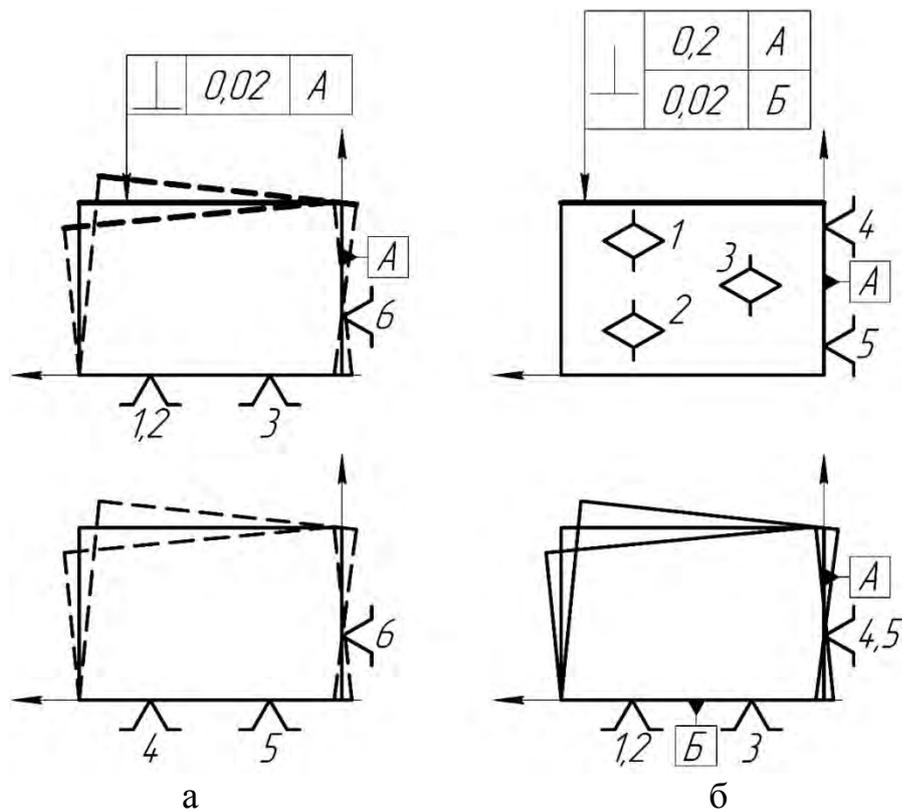


Рисунок 23 – Обеспечение требования к перпендикулярности плоскости:

а – иллюстрация утверждения 3, б – иллюстрация утверждения 4

*Утверждение 4.* Та технологическая база, по отношению к которой удельный допуск расположения или расстояний более жесткий, должна накладывать больше связей. Под удельным допуском понимается допуск расположения, приведенный к одной базовой длине.

Например, на рисунке 23 б базовая поверхность Б определена тремя направляющими векторами 1-3 как плоскость. Направляющая база (точки 4,5) определяет линию. Перпендикулярность относительно плоскости А, в отличие от плоскости Б, в полном объеме обеспечена быть не может. К плоскости Б допуск жестче, следовательно, его обеспечение является приоритетным для конструктора. Поэтому именно плоскость Б – тройная однонаправленная база.

Для определения комплектов баз (числа налагаемых связей) в приложении Б приведен массив продукционных моделей, соответствующий

ющих вариантам однозначного задания ориентации поверхности. Структура массива полностью соответствует структуре схемы вариантов корректного задания допусков расположения относительно составов баз. Каждому варианту задания допуска ставится в соответствие алгоритм определения комплекта.

Например, необходимо спроектировать схему базирования для операции обработки отверстия, на котором необходимо обеспечить допуск перпендикулярности оси относительно плоскости А (рис. 24).

Для состава баз ориентации № 1 алгоритм  $O_{10}$  гласит (приложение Б): если приоритетным является допуск перпендикулярности оси  $O_{10}$  относительно плоскости  $P_i$ , а допуск линейного размера относительно  $P_{j(k)}$  меньше допуска линейного размера относительно  $P_{k(j)}$ , то плоскость  $P_i$  назначается тройной однонаправленной (установочной) базой, плоскость  $P_{j(k)}$  – двойной однонаправленной (направляющей), плоскость  $P_{k(j)}$  – одиночной (опорной). Аналогично определяются компоненты комплекта, если задан допуск перпендикулярности относительно плоскости  $P_j$  либо плоскости  $P_k$  (рис. 24).

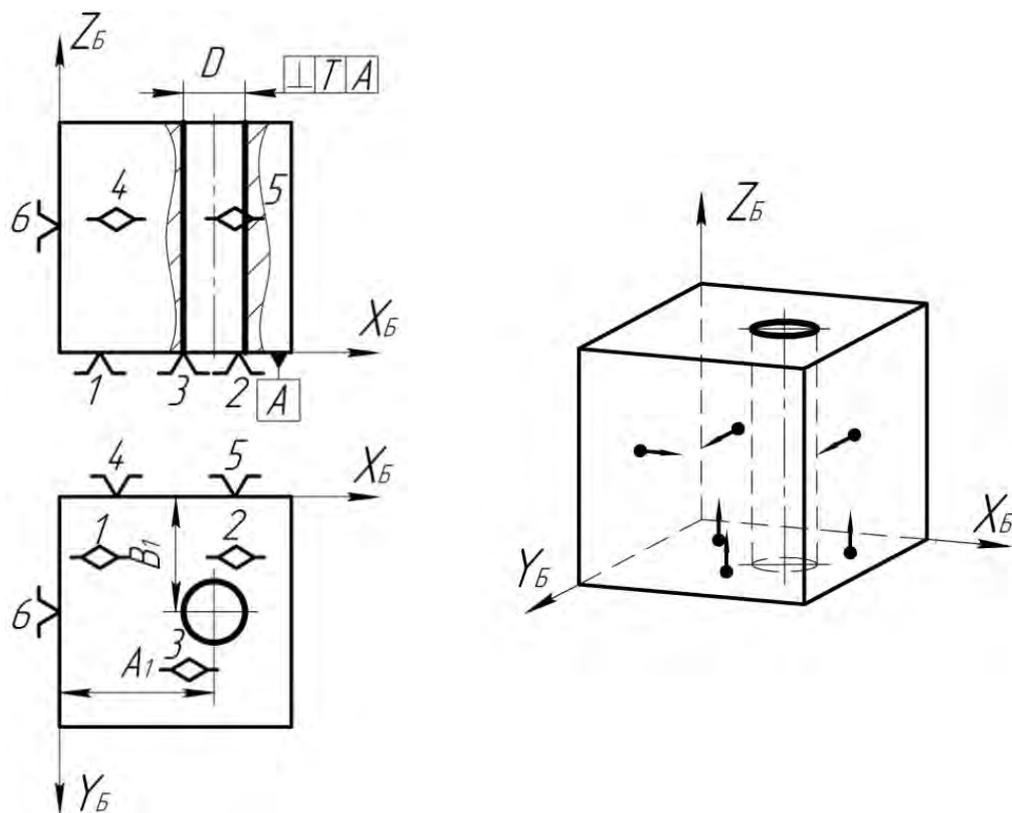


Рисунок 24 – Схема базирования рассматриваемой заготовки, разработанная по правилу  $O_{10}$  и модель расположения направляющих векторов

При использовании данной методики логика синтеза заменяется логикой выбора, что для человека не совсем удобно и наглядно. Поэто-

му неформально задачу синтеза схем базирования на операции можно решать согласно следующим шагам:

1. Построить контурное изображение ГМЗ с выделением обрабатываемых поверхностей и указание обозначений размерных связей и допусков расположения, которые необходимо обеспечить на операции.
2. Определить состав баз ориентации.
3. Определить главную базовую поверхность.
4. Наложить на главную базовую поверхность максимальное число связей (тройная однонаправленная (установочная), четверная (двойная направляющая), тройная разнонаправленная (тройная опорная) в сочетании с направляющей)
5. Дополнить выбранную базу до комплекта.
6. Сформировать базовую систему координат.

**Процедура 6.** Для синтеза схемы установки предлагается применять метод типовых технических решений, при реализации которого элементы комплекта схемы базирования заменяются соответствующими элементами схемы установки. Замена элемента схемы базирования элементом схемы установки осуществляется с помощью таблиц соответствия и сокращения вариантов технических решений (рис. 25, табл. 7, приложения В и Г). Случаи, в которых элемент схемы базирования заменяется режущим инструментом (так называемая передача функций базирующей подсистемы – инструменту (бесцентровое шлифование, протягивание отверстия короткой втулки и др.), в таблице соответствия не представлены ввиду редкого использования.



Рисунок 25 – Фрагмент схемы соответствия вида компонента возможным установочным элементам

Таблица 7 – Элементы таблицы сокращения вариантов

База	Код	Тип производства					Габариты и масса обрабатываемой детали				...
		е	мс	с	кс	м	м	с	к	ок	...
<b>3ОН</b>	Тр 1.1	х	х	х			х	х			...
	Тр 1.2	х	х	х	х	х		х	х	х	...
	Тр 1.3	х	х	х	х	х		х	х	х	...
	...										...
<b>2ОН</b>	Тр 2.1	х	х	х			х	х			...
	Тр 2.2	х	х	х	х			х	х	х	...
	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...

При базировании выверкой по разметке (единичное производство) установочными компонентами являются домкраты, подкладки, клинья, штангенрейсмас, универсальные измерительные средства.

Для реализации метода синтеза технических решений необходимо отобрать варианты установочных компонентов для реализации проектных баз. Выбранные компоненты заносятся в морфологическую таблицу 8. Здесь Ф1, Ф2, Ф3 – функции наложения числа связей или вида технологических баз.

Таблица 8 – Морфологическая таблица

Ф1	Ф2	Ф3
Тр 1.1.	Тр 2.1.	Тр 3.1.
Тр 1.2.	Тр 2.2.	Тр 3.2.
.....	.....	.....
Тр 1.i.	Тр 2.j.	Тр 3.k.

При выборе вариантов технических решений, заносимых в морфологическую таблицу, с помощью таблицы сокращения вариантов (приложение Г) учитываются ограничения: тип производства, габариты и масса обрабатываемой заготовки, показатели качества

базы, поверхность базирования (наружная, внутренняя), тип поверхности, характер базы (явная, скрытая), вид обработки (отделочная, чистовая, предварительная).

Далее осуществляется выбор одного элемента по каждому из столбцов морфологической таблицы и определяется точка приложения и направление силы зажима. Для сокращения числа рассматриваемых вариантов путем исключения наихудших комбинаций необходимо из морфологической таблицы выбрать два столбца (из первых трех) с наименьшим количеством вариантов технических решений ( $i < k < j$ ) и образовать из них все возможные парные комбинации (табл. 9).

Сравнительный анализ этих комбинаций по суммарной стоимости позволяет две-три из них (например, подчеркнутые) отнести к наилучшим и включить в дальнейшее рассмотрение, а остальные – исключить. Из исходной таблицы выбирается следующий столбец с наименьшим из

оставшихся числом вариантов технических решений, и составляются из них и отобранных парных комбинаций все возможные тройные комбинации. В конце концов, остается некоторое множество комбинаций, которое сокращается до одного-двух технических решений.

Таблица 9 – Варианты парных комбинаций

	Тр 3.1.	Тр 3.2.	...	Тр 3.k.
Тр 1.1.	Тр11,31	Тр11,32	Тр11,...	Тр11,3k
Тр 1.2.	Тр12,31	Тр12,32	Тр12,...	Тр12,3k
...	Тр...,31	Тр...,32	...	Тр...,3k
Тр 1.i.	Тр1i,31	Тр1i,32	Тр1i,...	Тр1i,3k

Направление силы зажима (в случае применения компонентов, не имеющих зажимных элементов) определяется в направлении технологической базы, накладывающей наибольшее количество связей. В случае применения призмы и компонента, реализующего опорную базу (за исключением самоцентрирующего компонента), возможно направлять силу зажима на этот компонент. Причем этот компонент располагается на максимальном удалении от оси технологической базы.

На рисунке 26 приведена схема установки и операционный эскиз для обработки рассматриваемой заготовки.

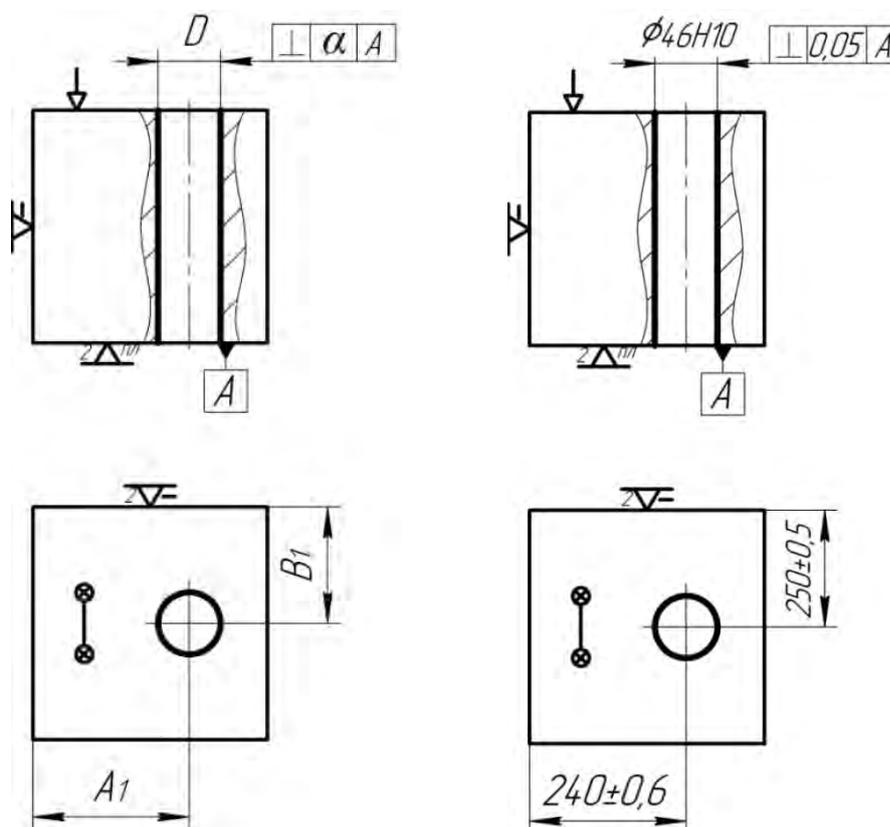


Рисунок 26 – Схема установки и операционный эскиз для обработки рассматриваемой заготовки

### 3.2.2 Системы поддержки принятия решений синтеза компоновок универсально-сборных станочных приспособлений

Предложенные методики, модели и алгоритмы позволили создать систему поддержки принятия решений универсально-сборных приспособлений для оригинальных нетиповых деталей при обработке на фрезерных обрабатывающих центрах [184–187]. Система разработана как приложение графических твердотельных редакторов Компас и Autodesk Inventor. Для формирования схемы установки и компоновки приспособления определен *состав установочных, установочно-зажимных* и прочих элементов УСП, сформирована база данных параметризованных моделей деталей комплектов ОАО «ВИСТАН» (г. Витебск), а также предложена общая структурная схема универсально-сборного приспособления (рис. 27).

Пользователь систем трехмерную твердотельную модель детали с кодированием функциональных модулей, допусков расположения и линейных размеров.

В приложении задаются технологические возможности оборудования, вектора доступности для обработки и др. Пользователь может сам указать подлежащие обработке на операции конструктивные элементы. Далее система предлагает несколько вариантов маршрута обработки заготовки с указанием приоритетных базовых поверхностей для обеспечения допусков расположения функциональных модулей, состав установочных, установочно-зажимных и(или) зажимных элементов, рекомендует состав базовых, направляющих и прочих элементов УСП, формирует несколько вариантов трехмерных компоновок приспособления, монтажные чертежи, а также наглядные схемы сборки-разборки сложных компоновок.

Система прошла опытную эксплуатацию и апробацию на ОАО «Вистан» (г. Витебск) и в учебном процессе УО «ВГТУ». На рисунке 28 показана модель состояния заготовки детали «Рукав 422-240711» (ОАО «Вистан») на предварительном этапе, а также соответствующие графы. Деталь состоит из шести ФМ образующих основную и вспомогательные сборочные базы, трех крепежных ФМ и ряда объединительных ФМ. В таблице 10 представлены составы баз ориентации.

Пусть необходимо спроектировать приспособление обработки ФМ ОБВ 1,2 и КР1 (поверхности  $o_{11}$  ( $o_{22}$ ,  $o_{23}$  ...),  $o_{17}$ ,  $1618$ ,  $o_{35}$ ) от комплекта баз  $o_{12}$ - $o_{12}$ пс-15. Состав баз ориентации – две плоскости и ось, лежащая в одной из плоскостей. Определение числа связей (комплекта технологических баз) сводится к продукционной модели О22: если задан допуск параллельности (соосности) относительно оси  $O_1$ , то ось  $O_1$  назначается четверной (двойной направляющей) базой, плоскости  $P_i$  и  $P_j$  назначаются одиночными (опорными) базами (приложение Б).

<b>1 Базовые детали</b>						
<b>1.1 Плиты квадратные и прямоугольные</b>						
1.1.1	1.1.2	1.1.3	1.1.4	1.1.5	1.1.6	1.1.7
<b>1.2 Плиты круглые</b>						
1.2.1	1.2.2	1.2.3	1.2.4	1.2.5	1.2.6	1.2.7
...						
<b>2 Корпусные детали</b>						
<b>2.1 Опоры угловые</b>			<b>2.2 Угольники крепежные</b>			
2.1.1	2.1.2	2.2.1	2.2.2	2.2.3	2.2.4	2.2.5
<b>2.3 Угольники ребристые</b>						
2.3.1	2.3.2	2.3.3	2.3.4	2.3.5	2.3.6	2.3.7
<b>2.4 Угольники с установочным отверстием</b>				<b>2.5 Угольники обыкновенные</b>		
2.4.1	2.4.2	2.4.3	2.4.4	2.5.1	2.5.2	2.5.3
...						
<b>5 Установочные детали</b>						
<b>5.1 Призмы с хвостовиком</b>			<b>5.2 Призмы опорные</b>			
5.1.1	5.1.2	5.2.1	5.2.2	5.2.3	5.2.4	5.2.5
...						
<b>5.5 Опоры квадратные</b>			<b>5.6 Опоры прямоугольные</b>			
5.5.1	5.5.2	5.5.3	5.6.1	5.6.2	5.6.3	
<b>5.7 Пальцы установочные цилиндрические и срезанные постоянные и сменные</b>						
5.7.1	5.7.2	5.7.3	5.7.4	5.7.5	5.7.6	

Рисунок 27 – Фрагмент классификатора параметризованных моделей компонентов УСП

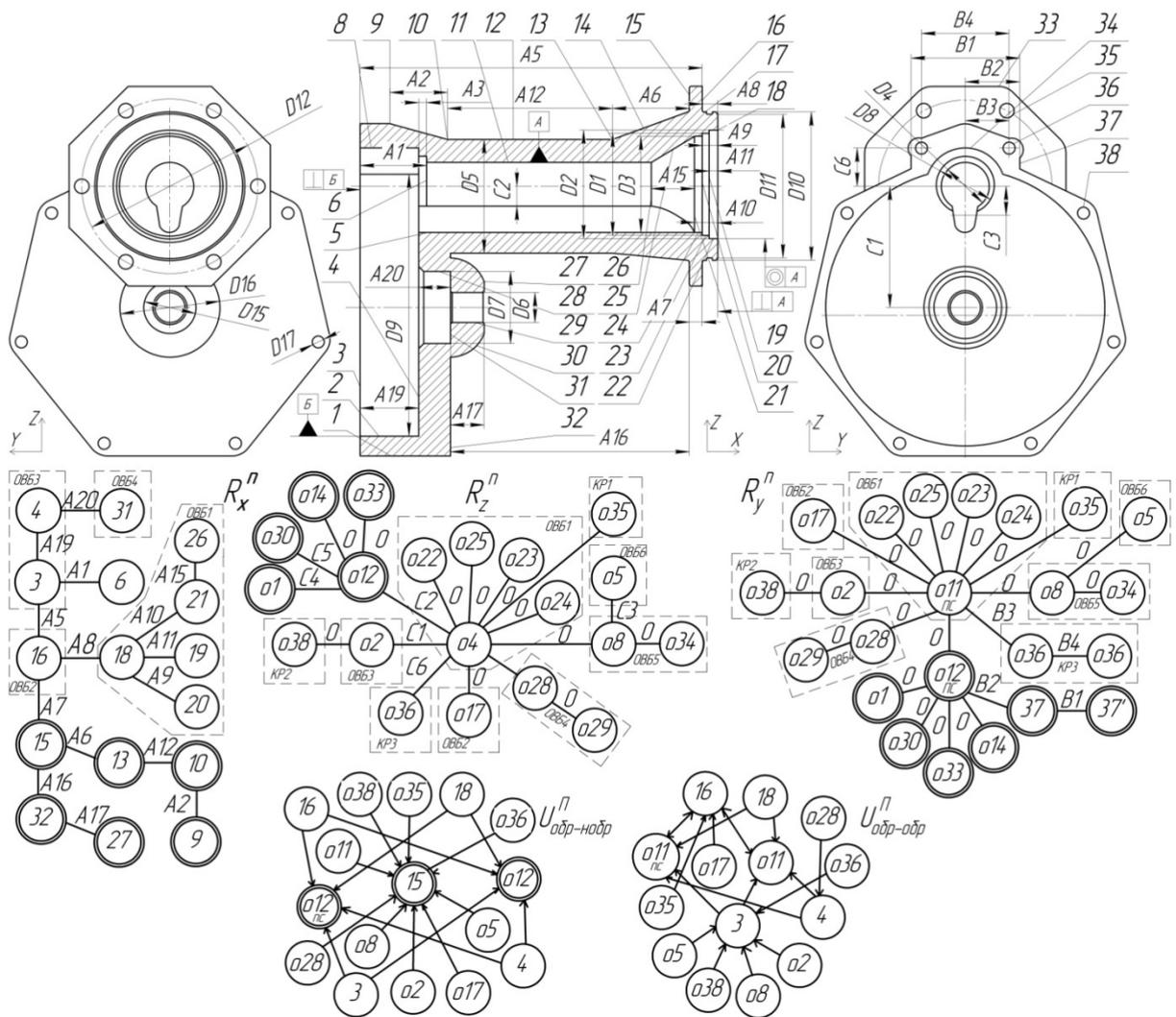


Рисунок 28 – Графическая модель состояния заготовки детали, а также соответствующие графы

Таблица 10 – Фрагмент таблицы составов баз ориентации

o11 (o22, o23 ...)	o17	o8	o5	18	16	...
o12-o12пс-15	o11-o11пс-15	o11-o11пс-15	o8-o8-15	o12-o12пс-15	o12-o12пс-15	...
o12-o12пс-16	o11-o11пс-16	o11-o11пс-16	o8-o8-3	o11-o11пс-16	o11-o11пс-16	
o17-o17-15		o5-o5-15				
o17-o17-16		o5-o5-16				
o2-o2-15						
...						

На рисунке 29 представлена схема базирования для рассматриваемой заготовки.

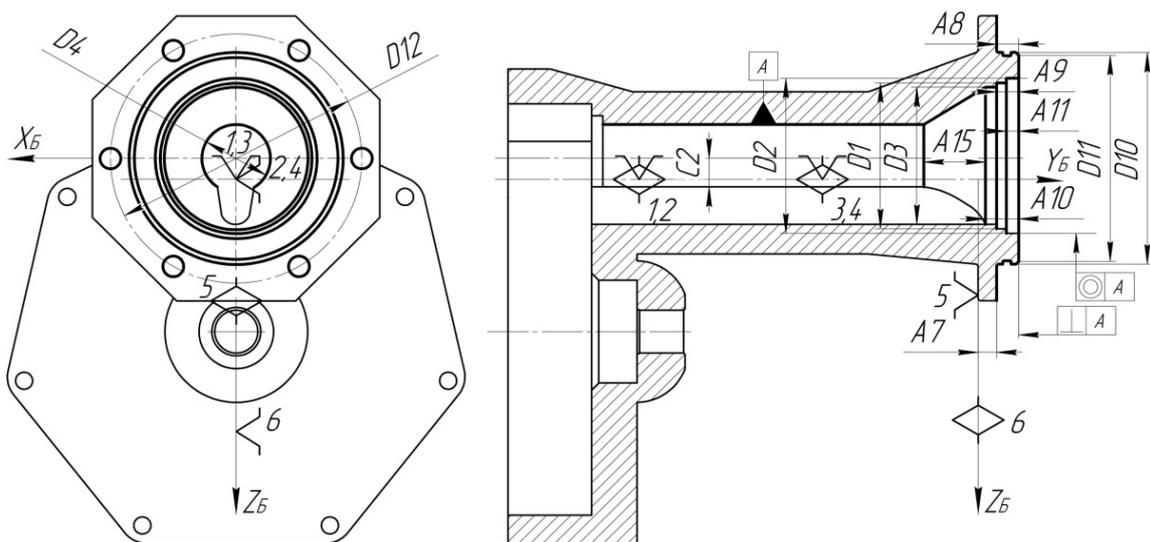


Рисунок 29 – Схема базирования с обозначением направляющих векторов:  $\nabla$  – на виде сбоку;  $\diamond$  – в плане

Для представленной схемы базирования формируется массив приемлемых технических решения по составу установочных элементов Тр5.2.2, Тр5.2.2, Тр5.8.1... Тогда схема установки для рассматриваемой заготовки примет вид, представленный на рисунке 30.

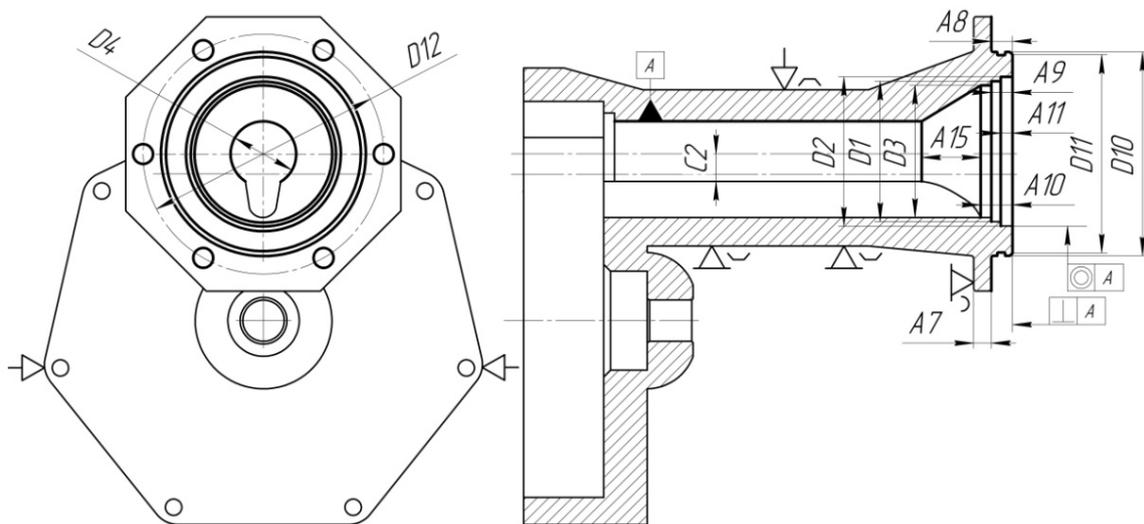


Рисунок 30 – Схема установки:

$\triangle$ ,  $\triangle$ ,  $\rightarrow$  – условные обозначения призматической опоры, точечной опоры со сферической поверхностью и точки приложения и направления силы закрепления

На рисунках 31–33 представлены интерфейсы работы программного обеспечения, ассоциативные схемы сборки и чертежи УСП, выполненные с помощью системы (деталь «Рукав 422-240711», ОАО «Ви-стан»).

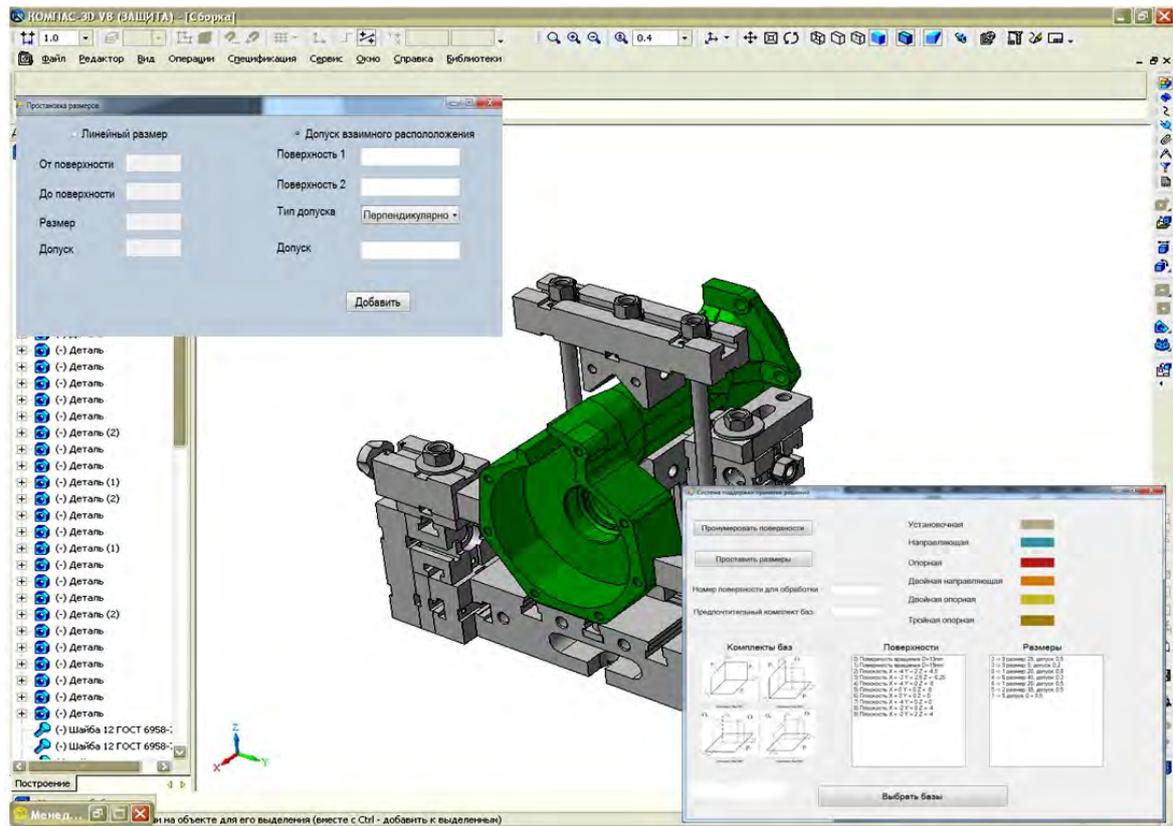


Рисунок 31 – Интерфейсы работы программного обеспечения

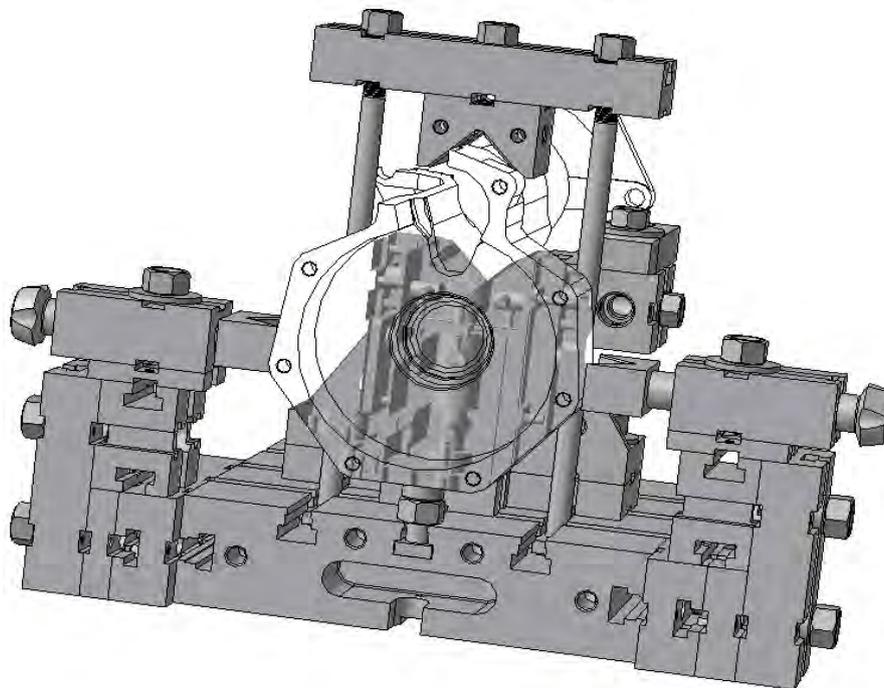


Рисунок 32 – Трехмерная модель приспособления, спроектированного по разработанной схеме установки

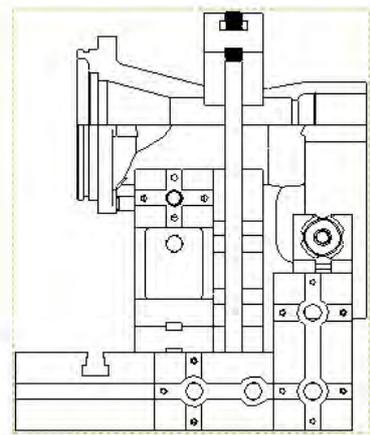
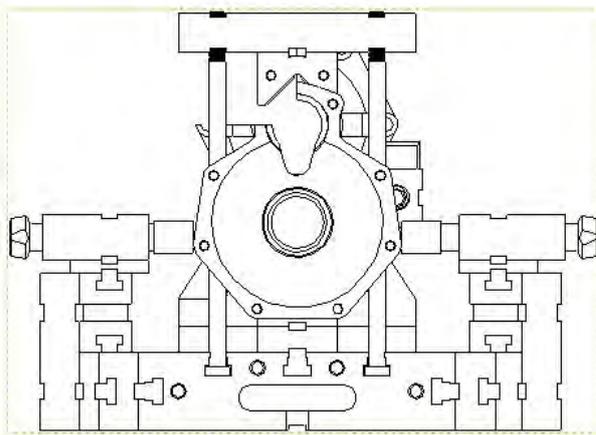
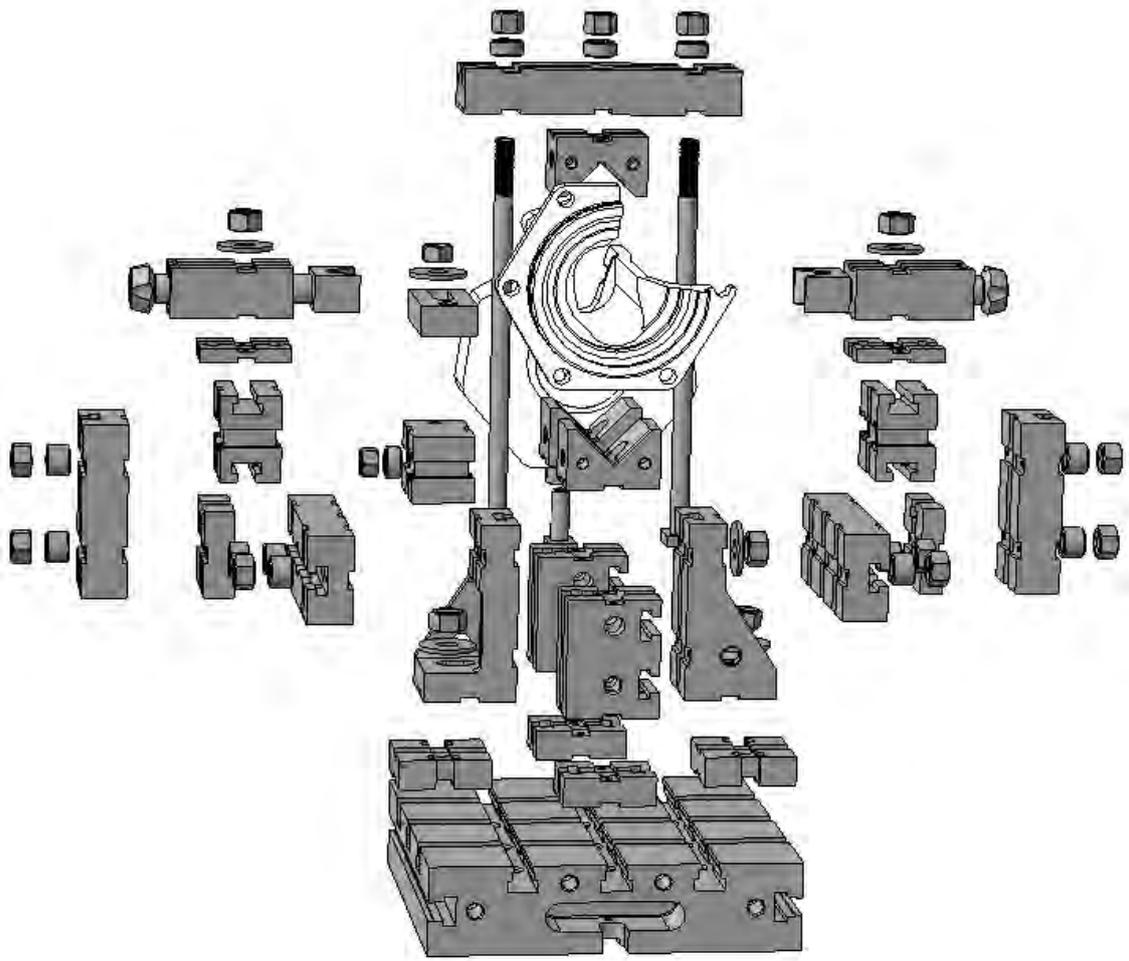


Рисунок 33 – Ассоциативные схемы сборки и контурное изображение универсально-сборного приспособления

### 3.3 Проектное базирование в аддитивном производстве

#### 3.3.1 Методическое и алгоритмическое обеспечение проектного базирования для аддитивного синтеза

Изложенные выше термины и определения позволяют предложить следующую последовательность процедур для построения моделей базирования модели детали в рабочей зоне 3D-принтера для обеспечения заданных чертежом допусков расположения и размеров:

- 1) формирование ГМД (ГМИЗ);
- 2) определение составов баз ориентации;
- 3) идентификация состава баз ориентации;
- 4) определение приоритета в обеспечении допуска расположения;
- 5) синтез схемы базирования;
- 6) определение компоновочно-кинематической схемы и задание системы координат 3D-принтера;
- 7) определение достижимой геометрической точности 3D-принтера;
- 8) ориентация модели детали в системе координат принтера;
- 9) формирование схемы установки и операционного эскиза.

**Процедура 1.** Для построения ГМД или ГМИЗ (рис. 34) необходимо:

- построить контурное изображение (или трехмерную модель) ГМД (ГМИЗ);
- произвести нумерацию поверхностей;
- проставить размерные связи и допуски расположения поверхностей согласно чертежу;
- построить графы линейных размерных связей  $R_{(x,y,z)}$  и графы угловых расположений  $U$  поверхностей.

При построении графов используются основные принципы процедуры 1 раздела 3.2.1 с учетом того, что при аддитивном синтезе техпроцесс не делится на этапы и реализуется за одну операцию, а поверхности не делятся на обрабатываемые и необрабатываемые.

**Процедура 2.** Алгоритм определения составов баз ориентации при аддитивном синтезе аналогичен алгоритму определения составов баз при механической обработке (смотреть процедуру 2 раздела 3.2.1). Отличие состоит в том, что составы определяются для всех без исключения поверхностей (см. табл. 11).

Таблица 11 – Составы баз ориентации для рассматриваемой детали на предварительном этапе обработки

1	о2	3	4	5	6	7
4-о2 <sub>x</sub> -о2 <sub>y</sub>	5-6-4	6-4-5	1-о2 <sub>x</sub> -о2 <sub>y</sub>	7-4-6 о2 <sub>y</sub> -4-6	о2 <sub>x</sub> -4-5 3-4-5	5-4-6

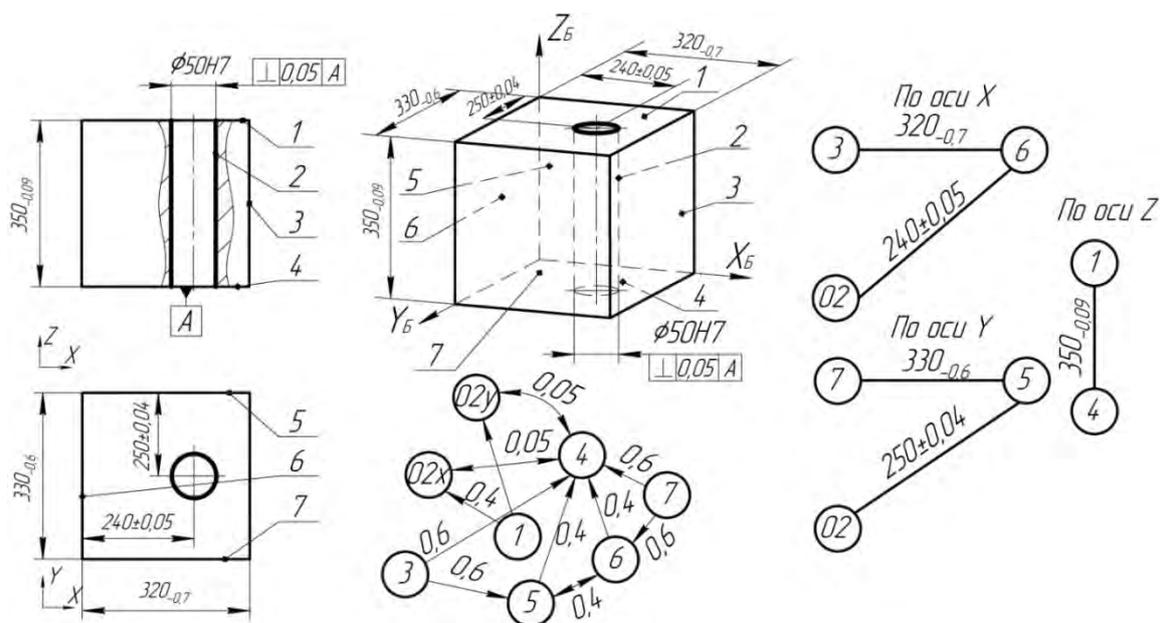


Рисунок 34 – Геометрическая модель детали

**Процедура 3.** Смотреть процедуру 3 раздела 3.2.1.

**Процедура 4.** Определение приоритета в обеспечении допуска расположения (см. процедуру 4 раздела 3.2.1) для аддитивного синтеза имеет особенность, связанную с тем, что техпроцесс 3D-печати не делится на операции. Приоритетность определяется по всем поверхностям для всех составов баз (табл. 12).

Таблица 12 – Определение удельных допусков

Поверхность	Состав баз	Допуск		Длина	Удельный допуск (на длине 1000 мм)
		Наименование	Значение		
...	...	...	...	...	...
o2	5	Размер	0,08	350	0,229
	6	Размер	0,1	350	0,286
	4	⊥	0,05	350	<b>0,143</b>
...	...	...	...	...	...
5	4	⊥	0,4	350	1,143
	6	⊥	0,4	320	1,250
	7	Размер	0,6	350	1,714
...	...	...	...	...	...

Согласно таблице 12 для рассматриваемого примера приоритетным является допуск перпендикулярности поверхности o2 относительно поверхности 4.

**Процедура 5.** Смотреть процедуру 5 раздела 3.2.1. Схема базирования при аддитивном синтезе рассматриваемой детали приведена на рисунке 35.

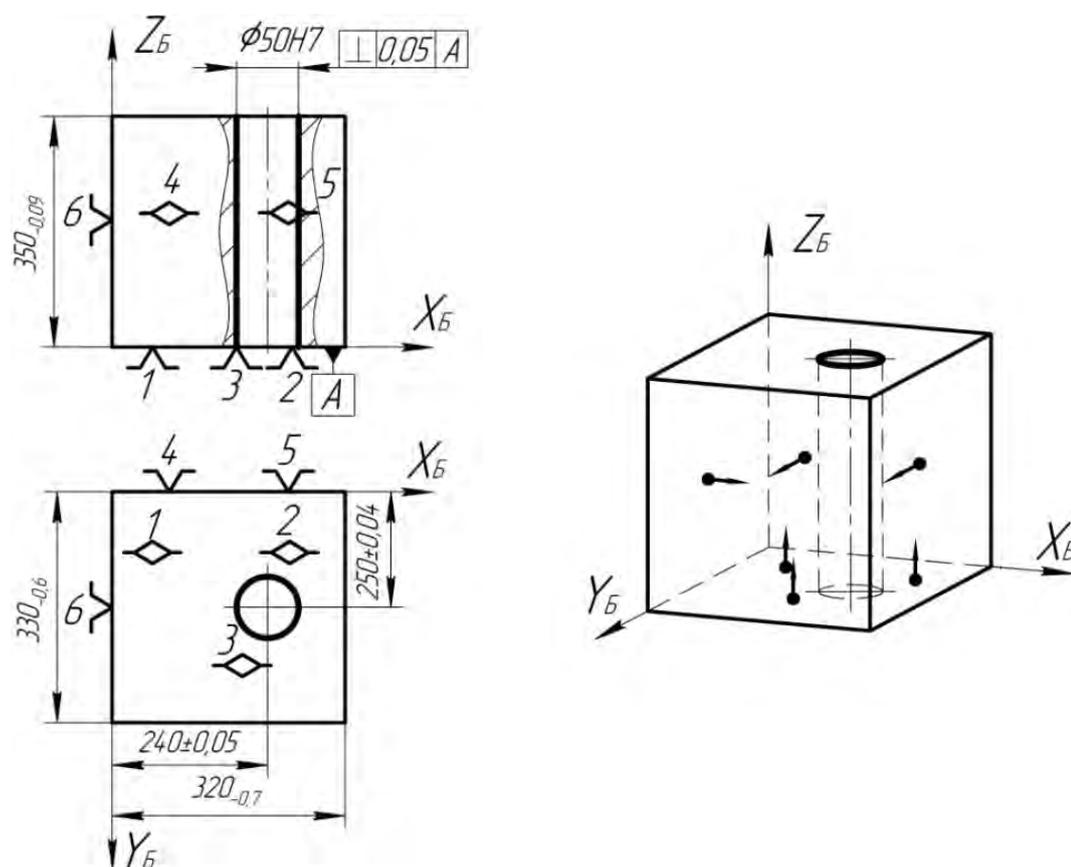


Рисунок 35 – Схема базирования и модель расположения направляющих векторов

**Процедура 6.** Компоновочно-кинематические схемы и системы координат 3D-принтера определяют методику анализа точности перемещений и ориентацию базовой системы координат в системе координат принтера.

На рисунке 36 приведены элементы классификатора компоновочно-кинематических схем FDM-принтеров.

**Процедура 7.** Для определения геометрической точности 3D-принтера в задаче базирования необходимо оценить параллельность перемещений слоеобразующего элемента по трем осям в двух направлениях для каждой оси: для оси X – в плоскостях XZ и XY; для Y – в плоскостях YZ и YX, для Z – в плоскостях ZY и ZX (рис. 37).

Указанная процедура может быть реализована тремя способами:

- по паспортным данным 3D-принтера (анализ паспортных данных показывает, что исследования геометрической точности практически не производятся);

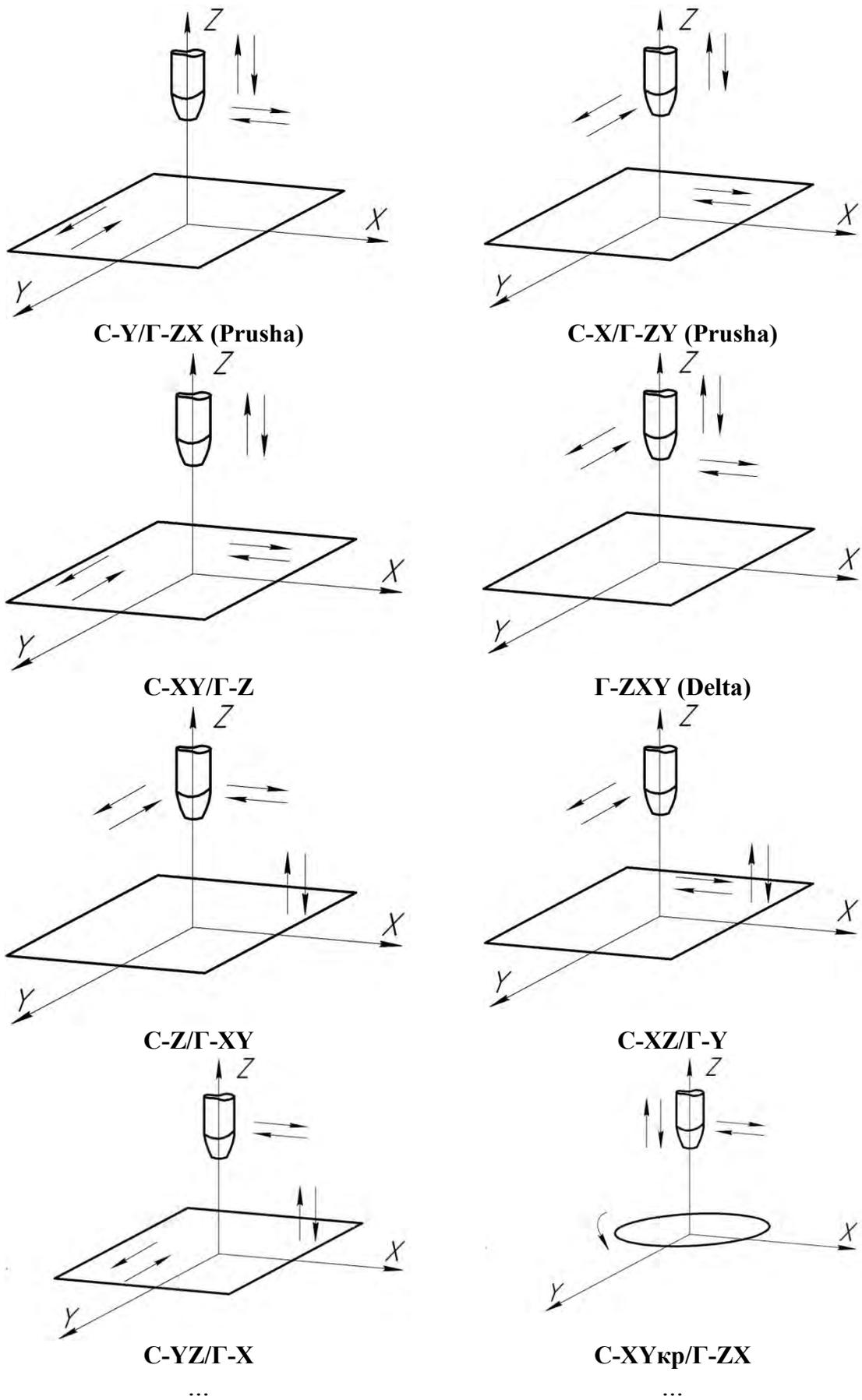


Рисунок 36 – Элементы классификатора компоновочно-кинематических схем FDM-принтеров

– с помощью индикаторного приспособления и методики, разработанной на основе ГОСТ 22267 «Станки металлорежущие. Схемы и способы измерения геометрических параметров» (рис. 38). При этом предлагается индикаторную головку устанавливать на место слоеобразующего элемента;

– печать на 3D-принтере опытных деталей, измерение на координатно-измерительной машине соответствующих параметров по трем осям в двух направлениях и пересчет на габариты рабочей зоны.

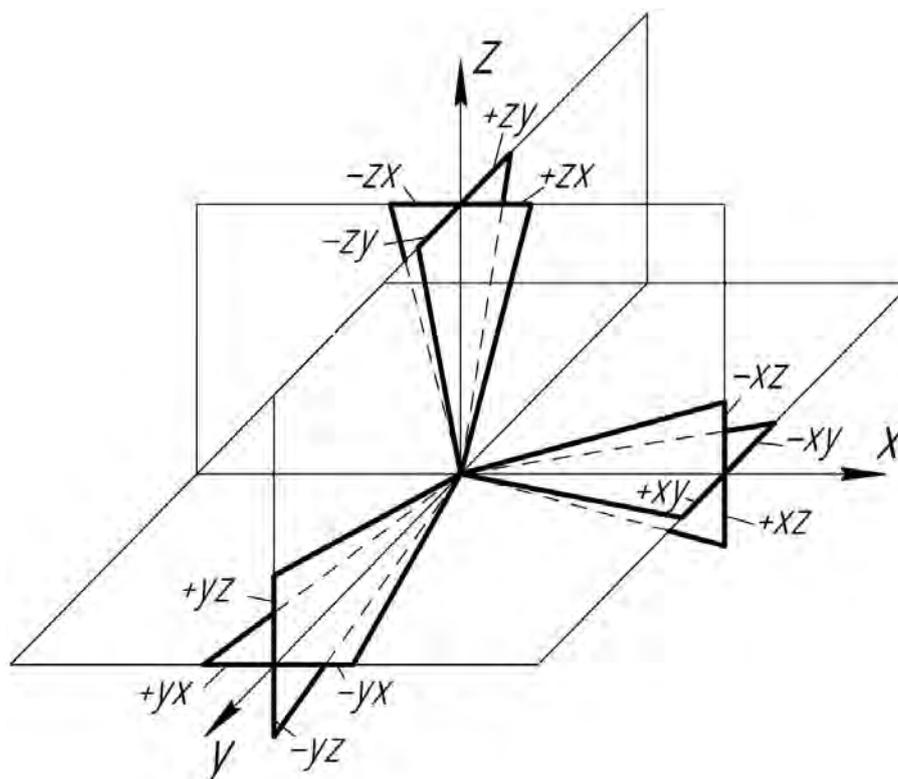


Рисунок 37 – Схема для оценки параллельности перемещений слоеобразующего элемента 3D-принтера

Недостатками второго способа являются невозможность учета влияния температурных деформаций и других свойств материалов, а также (в случае отсутствия паспортных данных по геометрической точности 3D-принтера) необходимость изготовления специальной оснастки для крепления и ориентации индикатора.

Недостатками третьего способа являются косвенность измерения, необходимость использования дорогостоящих средств измерения и расходование материалов.

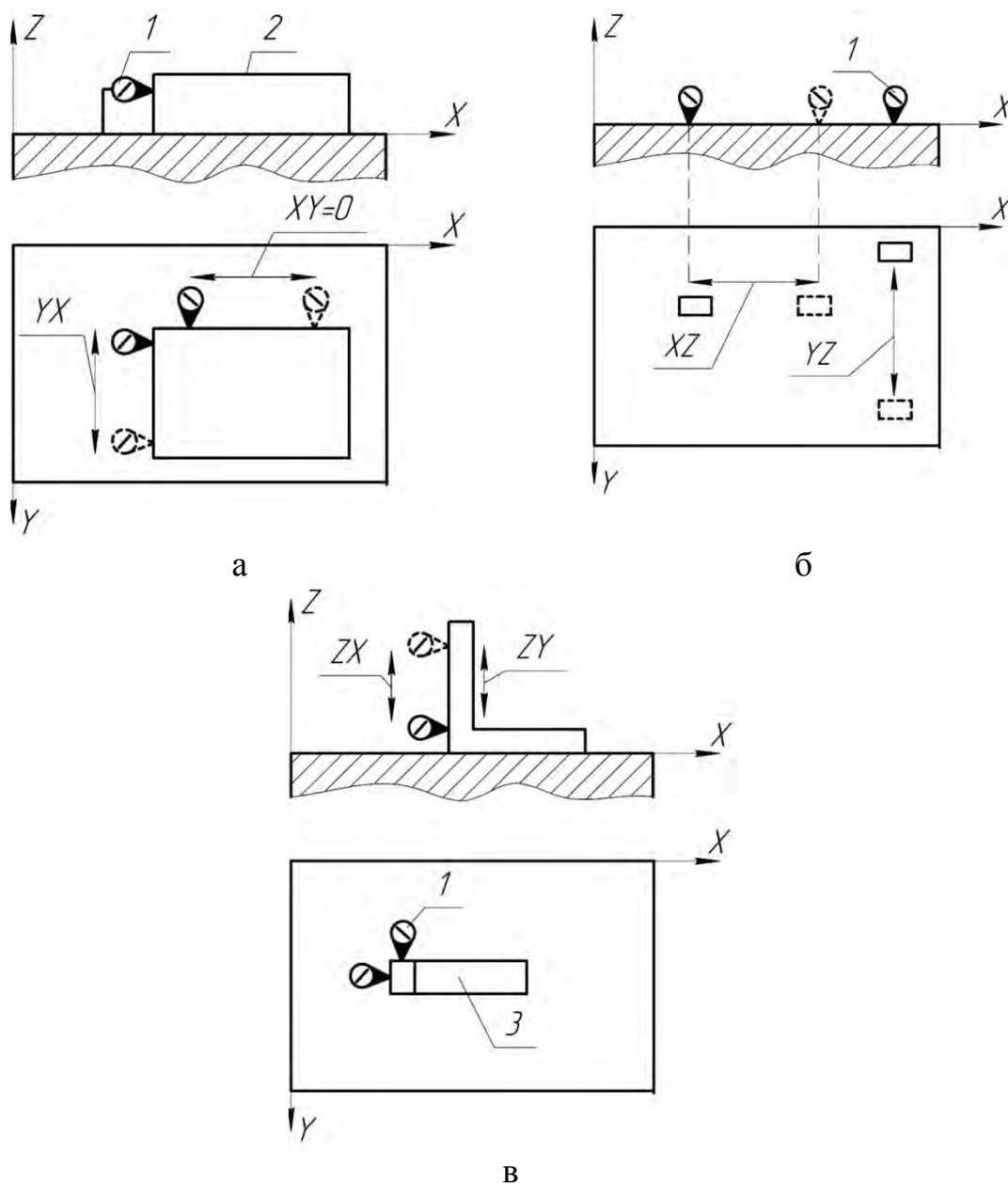


Рисунок 38 – Схемы методики измерения параллельности перемещений слоеобразующего элемента:

а – для осей X и Y в плоскости XY; б – для осей X и Y в плоскостях YZ и XZ; в – для оси Z в плоскостях YZ и XZ

**Процедура 8.** Ориентацию модели детали в рабочей зоне принтера предлагается осуществлять за счет ориентации базовой системы координат детали (сформированной в результате реализации процедуры 4 в системе координат принтера).

Для этого необходимо поверхность главной базы (или сочетание главной базы с другими базами, обеспечивающими допуск расположения) комплекта разместить в определенной плоскости (оси) системы координат принтера.

Так, на рисунке 39 приведены варианты возможной ориентации тройной однонаправленной базы (установочной) базы детали (рис. 35) в системе координат 3D-принтера.

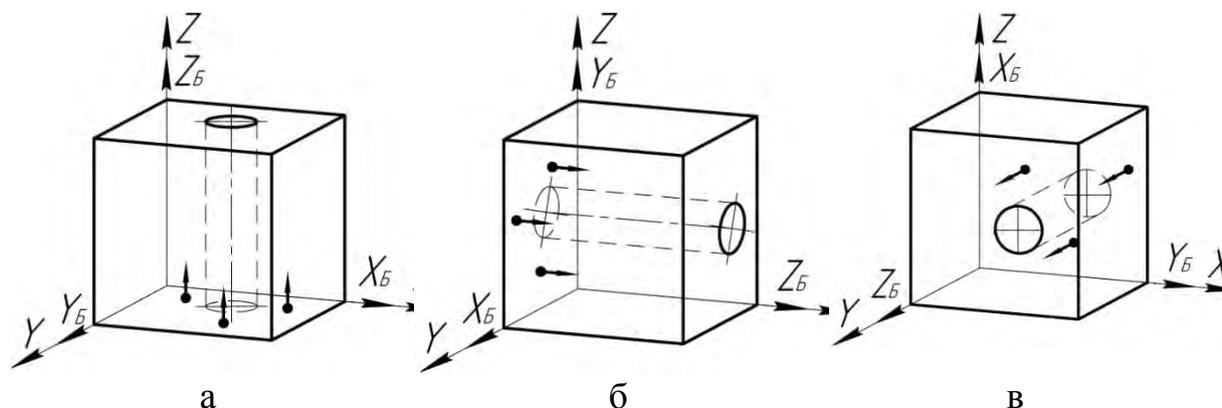


Рисунок 39 – Возможные варианты размещения установочной базы в системе координат принтера:

а – ось параллельна оси  $Z$ , б – ось параллельна оси  $X$ ,  
в – ось параллельна оси  $Y$

Анализ ориентаций рассматриваемых поверхностей в составах баз, а также правил определения комплектов баз позволил установить следующие главные базы и сочетания главной базы с другими базами, обеспечивающими приоритетный допуск расположения:

- 1) тройная однонаправленная (установочная);
- 2) четверная (двойная направляющая);
- 3) четверная (двойная направляющая) в сочетании с одиночной (опорной);
- 4) тройная разнонаправленная (тройная опорная) в сочетании с двойной однонаправленной (направляющей);

Перечисленные главные базы и сочетания главной базы с другими базами обеспечивают следующие приоритетные допуски расположения:

- 1) перпендикулярность оси относительно плоскости;
- 2) перпендикулярность плоскости относительно плоскости;
- 3) угол оси относительно плоскости;
- 4) угол плоскости относительно плоскости;
- 5) параллельность (соосность) оси относительно оси;
- 6) параллельность плоскости относительно плоскости;
- 7) перпендикулярность оси относительно оси;
- 8) угол оси относительно оси.

Пусть необходимо найти ориентацию тройной однонаправленной (установочной) базы, обеспечивающей приоритетную перпендикулярность оси относительно плоскости (рис. 40) в системе координат принтера с точностью печати линейных размеров (в случае отсутствия дан-

ных – перемещений по направляющим или линейного позиционирования) по осям  $T_x, T_y, T_z$  (первый вариант).

В случае геометрической погрешности плоскости  $XOY$  (зеркала стола) в которой может размещаться тройная однонаправленная (установочная) база на угол  $\alpha_x$  или  $\alpha_y$  (или одновременно на углы  $\alpha_x$  или  $\alpha_y$ ) допуск перпендикулярности  $T$  может быть обеспечен только на длине  $L_l$  (рис. 40 а, б и в) относительно плоскости  $T$  и  $T_{x(y)}$ , в зависимости от геометрической точности

$$L_{1x} = \frac{T - T_x}{\operatorname{tg} \alpha_x}, L_{1y} = \frac{T - T_y}{\operatorname{tg} \alpha_y}$$

где  $\alpha_x, \alpha_y$  – углы наклона направляющей, который может быть определен по геометрической точности принтера в заданном координатном направлении (см. процедуру 7).

Также возможен случай «наложения» геометрической погрешности расположения направляющих по осям  $X$  и  $Z$  (рис. 40 г) или  $Y$  и  $Z$ , что уменьшает область обеспечения допуска перпендикулярности в заданном координатном направлении. И наоборот, возможен случай компенсации погрешностей в том случае, если по осям  $X$  и  $Z$  (или  $Y$  и  $Z$ ) имеется геометрическая погрешность направляющих в противоположных угловых направлениях.

На рисунках 40 а–г прямоугольниками показаны области полей допусков  $T$  и  $T_x$  в плоскости длины рассматриваемого элемента. В том случае, если квадрат поля допуска  $T$  не пересекается с прямоугольником точности  $T_{x(y)}$ , то допуск обеспечить на всей длине невозможно. В случае частичного пересечения указанных полей допусков, можно говорить о вероятности обеспечения допуска. Таким образом, появляется возможность прогнозирования точности допусков расположения на длине.

Анализ обеспечения допуска перпендикулярности в случае параллельности рассматриваемой оси  $Z$  сводится к проверке условий

$$T \geq T_x, T \geq T_y, L \leq L_{1x^{\pm}z^{\pm}}, L \leq L_{1y^{\pm}z^{\pm}}$$

где

$$L_{1x^{\pm}z^{\pm}} = \frac{T - T_x}{\operatorname{tg}(|\pm \alpha_x \pm \alpha_z|)}$$

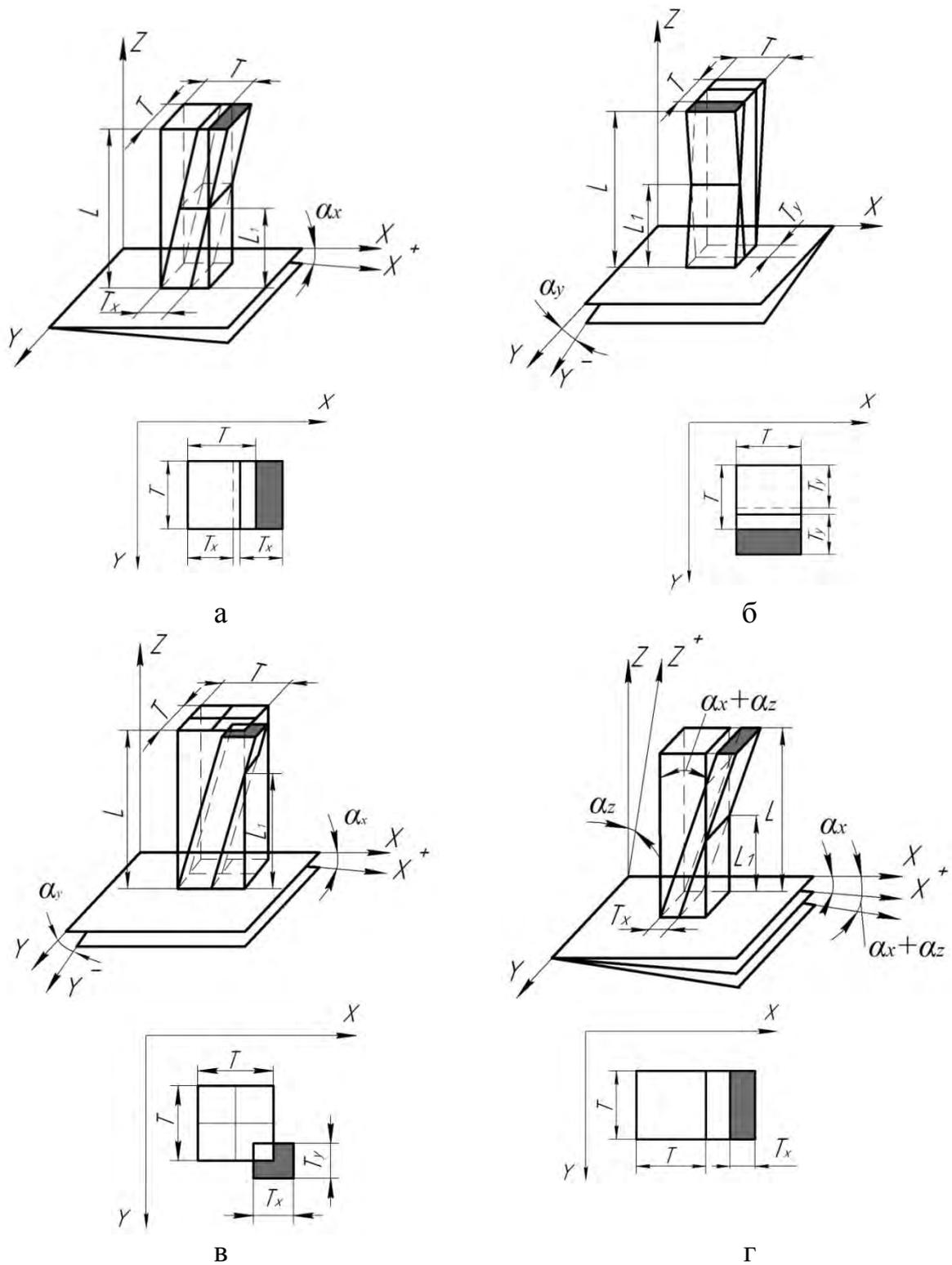


Рисунок 40 – Некоторые варианты размещения полей допусков  $T_x$  и  $T_y$  позиционирования в поле допуска  $T$  перпендикулярности оси в зависимости от геометрической точности принтера:  
а – непараллельность по оси  $X$  в плоскости  $XOZ$ ; б – непараллельность по оси  $Y$  в плоскости  $YOZ$ ; в – суммарная погрешность по осям  $X$  и  $Y$  в плоскостях  $XOZ$  и  $YOZ$ ; г – суммарная погрешность по осям  $X$  и  $Z$  в плоскости  $XOZ$

$$L_{1x^+z^+} = \frac{T - T_x}{\operatorname{tg}(\alpha_x + \alpha_z)} \quad L_{1x^+z^-} = \frac{T - T_x}{\operatorname{tg}(|\alpha_x - \alpha_z|)}$$

$$L_{1x^-z^+} = \frac{T - T_x}{\operatorname{tg}(|-\alpha_x + \alpha_z|)} \quad L_{1x^-z^-} = \frac{T - T_x}{\operatorname{tg}(|-\alpha_x - \alpha_z|)}$$

$$L_{1y^\pm z^\pm} = \frac{T - T_y}{\operatorname{tg}(|\pm \alpha_y \pm \alpha_z|)}$$

$$L_{1y^+z^+} = \frac{T - T_y}{\operatorname{tg}(\alpha_y + \alpha_z)} \quad L_{1y^+z^-} = \frac{T - T_y}{\operatorname{tg}(|\alpha_y - \alpha_z|)}$$

$$L_{1y^-z^+} = \frac{T - T_y}{\operatorname{tg}(|-\alpha_y + \alpha_z|)} \quad L_{1y^-z^-} = \frac{T - T_y}{\operatorname{tg}(|-\alpha_y - \alpha_z|)}$$

Анализ обеспечения допуска перпендикулярности в случае параллельности рассматриваемой оси  $X$  сводится к проверке условий:

$$T \geq T_z, T \geq T_y, L \leq L_{1x^\pm z^\pm}, L \leq L_{1y^\pm x^\pm}$$

Анализ обеспечения допуска перпендикулярности в случае параллельности рассматриваемой оси  $Y$  сводится к проверке условий:

$$T \geq T_x, T \geq T_z, L \leq L_{1x^\pm y^\pm}, L \leq L_{1y^\pm z^\pm}$$

Пусть необходимо найти ориентацию тройной однонаправленной (установочной) базы, обеспечивающей приоритетную перпендикулярность *плоскости* относительно плоскости в системе координат принтера (второй вариант обеспечения приоритетного допуска расположения).

В случае поворота плоскости  $XOY$  (зеркала стола), в которой может размещаться тройная однонаправленная (установочная) база, на угол  $\alpha_x$  допуск перпендикулярности  $T$  может быть обеспечен только на длине  $L_I$  (рис. 41 а):

$$L_{1x} = \frac{T - T_x}{\operatorname{tg} \alpha_x}.$$

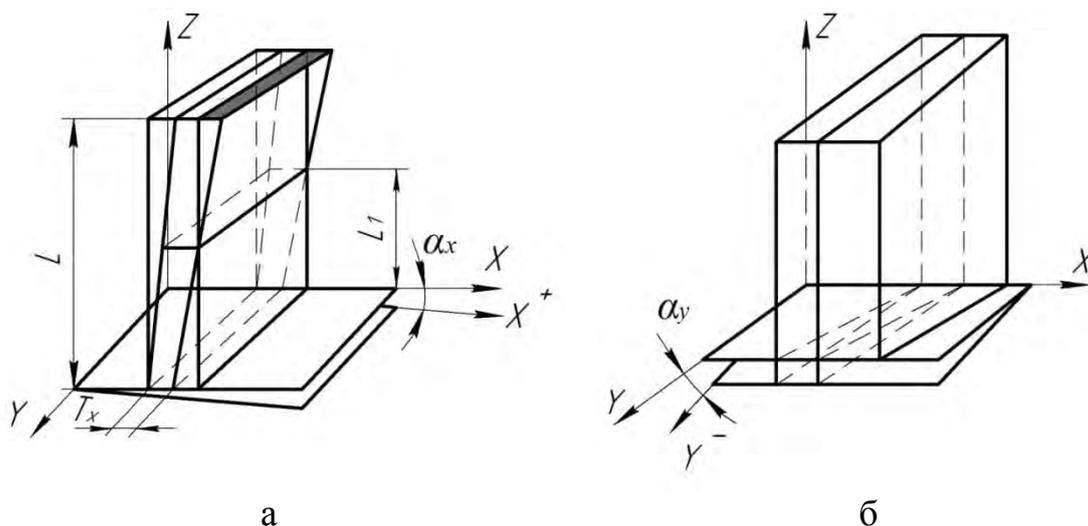


Рисунок 41 – Некоторые варианты размещения поля допуска  $T_x$  позиционирования в поле допуска  $T$  перпендикулярности плоскости в зависимости от геометрической точности принтера:

- а – непараллельность по оси  $X$  в плоскости  $XOZ$ ;
- б – непараллельность по оси  $Y$  в плоскости  $YOZ$

Поворот плоскости  $XOY$  (зеркала стола), в которой может размещаться тройная однонаправленная (установочная), на угол  $\alpha_y$  никак не влияет на допуск перпендикулярности  $T$  (рис. 41 б).

Также возможен случай «наложения» геометрической погрешности расположения направляющих по осям  $X$  и  $Z$ , что уменьшает область обеспечения допуска перпендикулярности в заданном координатном направлении. И наоборот, возможен случай компенсации погрешностей, если по осям  $X$  и  $Z$  имеется геометрическая погрешность направляющих в противоположных угловых направлениях.

Анализ обеспечения допуска перпендикулярности в случае параллельности рассматриваемой плоскости плоскостям  $ZOY$  или  $ZOX$  сводится к проверке соответствующих условий:

$$T \leq T_x, L \leq L_{1x^{\pm}z^{\pm}} \text{ или } T \leq T_y, L \leq L_{1y^{\pm}z^{\pm}}$$

Анализ обеспечения допуска перпендикулярности в случае параллельности рассматриваемой плоскости плоскостям  $XOZ$  или  $XOY$  сводится к проверке соответствующих условий:

$$T \leq T_y, L \leq L_{1y^{\pm}x^{\pm}} \text{ или } T \leq T_z, L \leq L_{1x^{\pm}z^{\pm}}$$

Анализ обеспечения допуска перпендикулярности в случае параллельности рассматриваемой плоскости плоскостям  $YOX$  или  $YOZ$  сводится к проверке соответствующих условий:

$$T \leq T_z, L \leq L_{1y^+z^\pm} \quad \text{или} \quad T \leq T_x, L \leq L_{1x^\pm y^\pm}$$

Таким образом, задача ориентации базовой системы координат детали (ориентации модели детали в рабочей зоне 3D-принтера) сводится к определению оптимальной плоскости (оси или сочетания оси и плоскости) системы координат 3D-принтера для размещения главной базы (или сочетания главной базы и другой базы) для достижения заданного допуска расположения на заданной длине.

Определение оптимальной плоскости (оси или сочетания оси и плоскости) системы координат 3D-принтера предлагается определять с помощью матриц элементов. В таблицах 13–15 представлены соответствующие матрицы для определения ориентации тройной однонаправленной (установочной) базы при обеспечении перпендикулярности оси относительно плоскости и плоскости относительно плоскости.

Таблица 13 – Матрица для определения ориентации тройной однонаправленной (установочной) базы при обеспечении перпендикулярности оси относительно плоскости

		X		Y		Z	
		X <sup>+</sup>	X <sup>-</sup>	Y <sup>+</sup>	Y <sup>-</sup>	Z <sup>+</sup>	Z <sup>-</sup>
X	X <sup>+</sup>			$L_{1x^+y^+}$	$L_{1x^+y^-}$	$L_{1x^+z^+}$	$L_{1x^+z^-}$
	X <sup>-</sup>			$L_{1x^-y^+}$	$L_{1x^-y^-}$	$L_{1x^-z^+}$	$L_{1x^-z^-}$
Y	Y <sup>+</sup>	$L_{1x^+y^+}$	$L_{1x^+y^-}$			$L_{1y^+z^+}$	$L_{1y^+z^-}$
	Y <sup>-</sup>	$L_{1x^-y^+}$	$L_{1x^-y^-}$			$L_{1y^-z^+}$	$L_{1y^-z^-}$
Z	Z <sup>+</sup>	$L_{1x^+z^+}$	$L_{1x^+z^-}$	$L_{1y^+z^+}$	$L_{1y^+z^-}$		
	Z <sup>-</sup>	$L_{1x^-z^+}$	$L_{1x^-z^-}$	$L_{1y^-z^+}$	$L_{1y^-z^-}$		
Проверка условий		$L \leq L_{1x^\pm y^\pm}$ $L \leq L_{1x^\pm z^\pm}$		$L \leq L_{1x^\pm y^\pm}$ $L \leq L_{1y^\pm z^\pm}$		$L \leq L_{1x^\pm z^\pm}$ $L \leq L_{1y^\pm z^\pm}$	
Тройная однонаправленная		YOZ		XOZ		XOY	

Таблица 14 – Матрица для определения ориентации тройной однонаправленной (установочной) базы при обеспечении перпендикулярности плоскости (параллельной ZOY или XOZ, или YOX) относительно плоскости

		X		Y		Z	
		X <sup>+</sup>	X <sup>-</sup>	Y <sup>+</sup>	Y <sup>-</sup>	Z <sup>+</sup>	Z <sup>-</sup>
X	X <sup>+</sup>			$L_{1x^+y^+}$	$L_{1x^+y^-}$		
	X <sup>-</sup>			$L_{1x^-y^+}$	$L_{1x^-y^-}$		
Y	Y <sup>+</sup>					$L_{1y^+z^+}$	$L_{1y^+z^-}$
	Y <sup>-</sup>					$L_{1y^-z^+}$	$L_{1y^-z^-}$
Z	Z <sup>+</sup>	$L_{1x^+z^+}$	$L_{1x^+z^-}$				
	Z <sup>-</sup>	$L_{1x^-z^+}$	$L_{1x^-z^-}$				
Проверка условий		$L \leq L_{1x^\pm z^\pm}$		$L \leq L_{1x^\pm y^\pm}$		$L \leq L_{1y^\pm z^\pm}$	
Тройная однонаправленная		XOY		YOZ		XOZ	

Таблица 15 – Матрица для определения ориентации тройной однонаправленной (установочной) базы при обеспечении перпендикулярности плоскости (параллельной ZOX или XOY, или YOZ) относительно плоскости

		X		Y		Z	
		X <sup>+</sup>	X <sup>-</sup>	Y <sup>+</sup>	Y <sup>-</sup>	Z <sup>+</sup>	Z <sup>-</sup>
X	X <sup>+</sup>					$L_{1x^+z^+}$	$L_{1x^+z^-}$
	X <sup>-</sup>					$L_{1x^-z^+}$	$L_{1x^-z^-}$
Y	Y <sup>+</sup>	$L_{1x^+y^+}$	$L_{1x^+y^-}$				
	Y <sup>-</sup>	$L_{1x^-y^+}$	$L_{1x^-y^-}$				
Z	Z <sup>+</sup>			$L_{1y^+z^+}$	$L_{1y^+z^-}$		
	Z <sup>-</sup>			$L_{1y^-z^+}$	$L_{1y^-z^-}$		
Проверка условий		$L \leq L_{1x^\pm y^\pm}$		$L \leq L_{1y^\pm z^\pm}$		$L \leq L_{1x^\pm z^\pm}$	
Тройная однонаправленная		XOY		YOZ		XOZ	

Аналогично составляются матрицы определения ориентации главных баз и сочетаний главной базы с другими базами в системе координат принтера в зависимости от необходимости обеспечения приоритетных допусков расположения.

**Процедура 9.** На рисунке 42 показана возможная схема установки для рассматриваемой операции 3D-печати. Операционный эскиз аналогичен схеме установки.

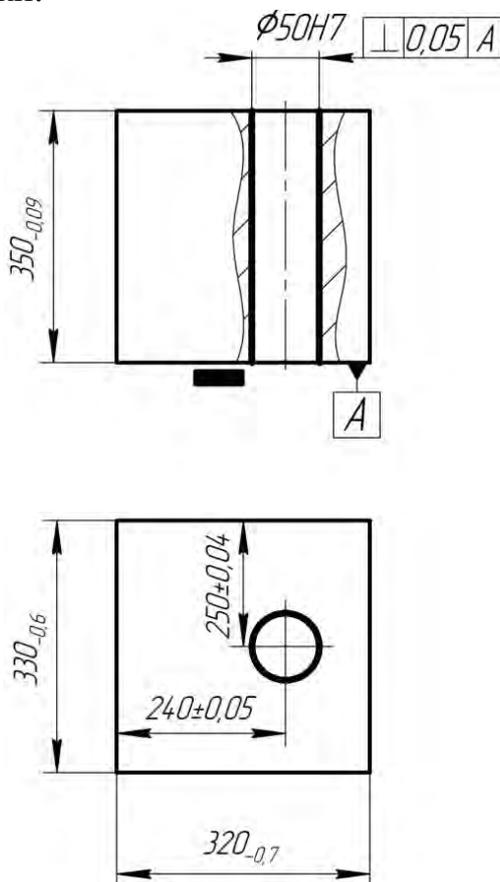


Рисунок 42 – Схема установки

### 3.3.2 Системы поддержки принятия решений по базированию моделей деталей машин в рабочей зоне 3D-принтеров

В том случае, если заданный допуск расположения невозможно обеспечить при ориентации главной базы перпендикулярно плоскостям системы координат принтера на всей длине с вероятностью 100 %, то необходимо определить углы поворота базовой поверхности, позволяющие полностью разместить поле допуска  $T_{x(y,z)}$  в поле допуска  $T$  (рис. 40 и 41). Для определения углов поворота несложно составить соответствующие модели учитывающие геометрическую точность принтера  $\alpha_{xz(xy)}$ ,  $\alpha_{zx(zx)}$ ,  $\alpha_{yz(yx)}$ . При этом следует учитывать то, что при по-

вороте модели вокруг осей  $X$  и  $Y$  возникает необходимость использования поддержек.

Аналогичные рассуждения позволили составить матрицы для определения ориентации главных баз и сочетаний главной базы с другими базами в системе координат принтера в зависимости от необходимости обеспечения приоритетных допусков расположения, а также разработать программное обеспечение системы поддержки принятия решений по базированию моделей для 3D-печати (рис. 43 и 44).

Программное обеспечение разработано на языке C# в виртуальной среде Microsoft Visual Studio 2019 с использованием стандартных элементов и математических функций. При работе с системой пользователь последовательно вводит информацию о компоновочно-кинематической схеме принтера, его точности позиционирования и геометрической точности по осям, параметрах поверхности с приоритетным допуском [188–192].

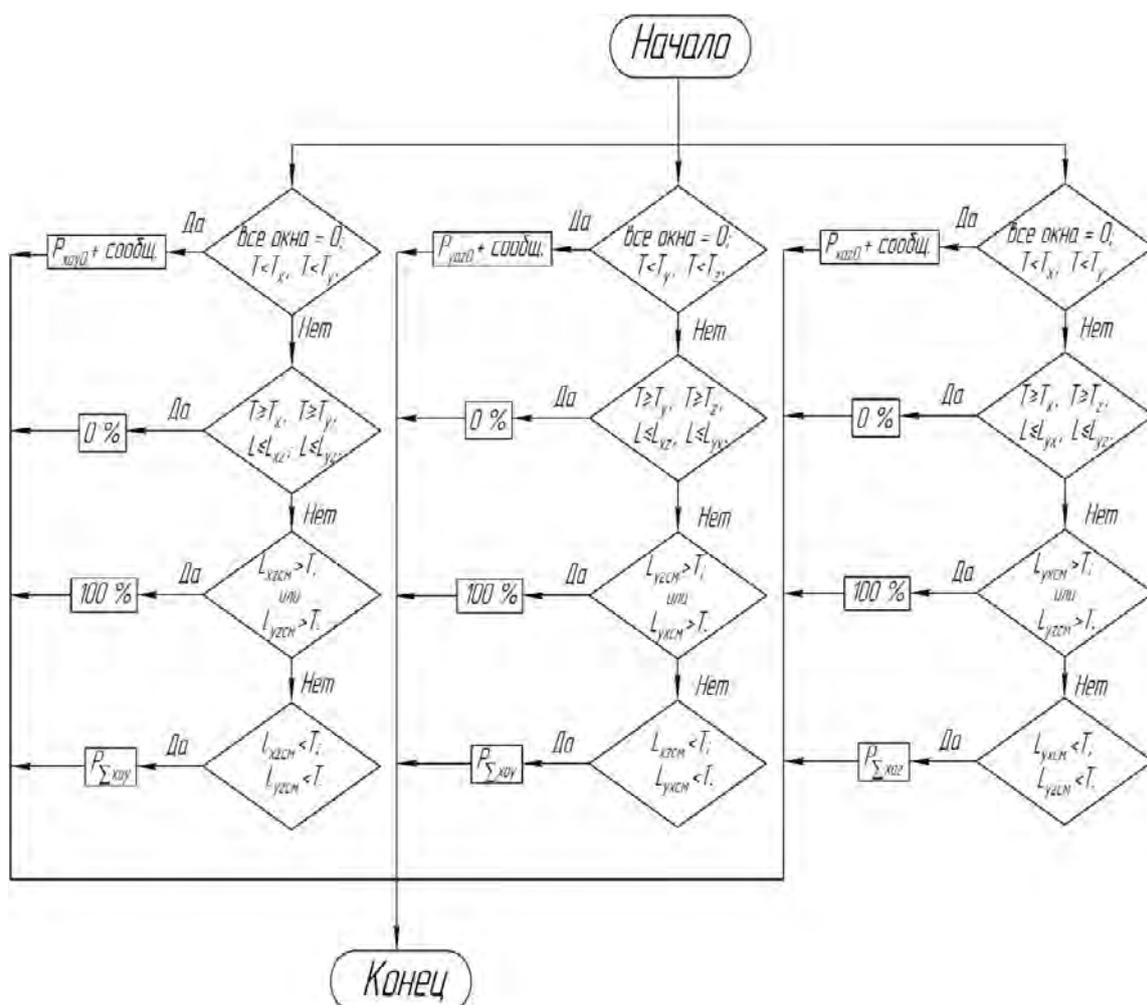
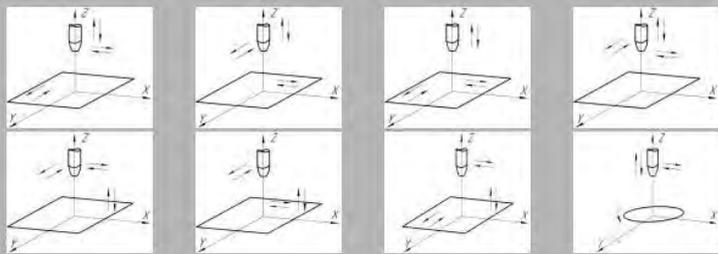


Рисунок 43 – Принципиальная блок-схема работы программного обеспечения

Результатом работы являются сведения о возможности обеспечения допуска расположения на заданной длине при различном базировании модели детали относительно осей системы координат принтера, а также рекомендации о возможном повороте модели для обеспечения приоритетного допуска расположения (рис. 44).

Характеристики 3D принтера  
Компоновочно-кинематическая схема 3D принтера



Выбрать

Очистить

Габариты рабочего пространства, мм:

По оси X	1000
По оси Y	1000
По оси Z	1000

Точность позиционирования, мм:

По оси X	0,003
По оси Y	0,003
По оси Z	0,002

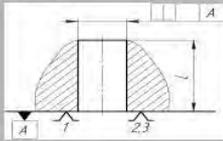
Геометрическая точность, мм:

	XOZ	YOZ	XOY
По оси X	0,01	—	0,01
По оси Y	—	0,12	0,12
По оси Z	0,02	0,02	—

Выберите допуск взаимного расположения:

- перпендикулярность оси относительно плоскости;
- перпендикулярность плоскости относительно плоскости;
- угол оси относительно плоскости;
- угол плоскости относительно плоскости;
- параллельность (соосность) оси относительно оси;
- параллельность плоскости относительно плоскости;
- перпендикулярность оси относительно оси.
- угол оси относительно оси.

Параметры допуска



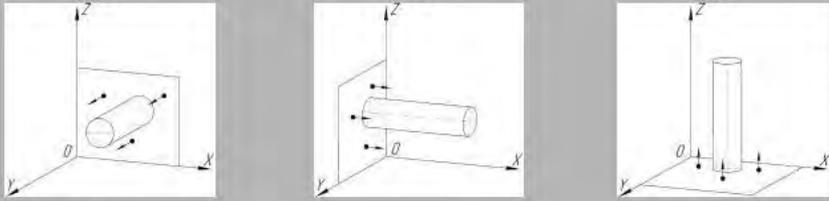
Введите L, мм: 350

Введите значение допуска, мм: 0,05

Результат

---

XOZ YOZ XOY

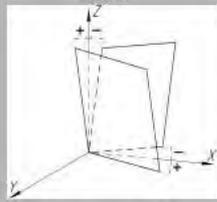


Вероятность брака

XOZ	YOZ	XOY
94,5 %	0 %	59,5 %

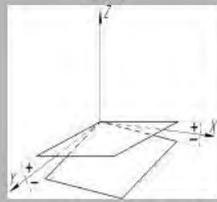
Рекомендуемые углы поворота модели детали

XOZ



	рад.	град.
Z	-0,00014	0°0'28"
X	-0,00013	0°0'26"

XOY



	рад.	град.
X	-3E-05	0°0'6"
Y	-0,00014	0°0'28"

Рисунок 44 – Интерфейсы программного обеспечения системы поддержки принятия решений

## 4 РАЗМЕРНАЯ НАСТРОЙКА И ПОГРЕШНОСТЬ БАЗИРОВАНИЯ

### 4.1 Понятие статической и динамической размерной настройки

Под размерной настройкой будем понимать ориентацию (базирование) формообразующих элементов режущей кромки инструмента относительно технологических баз обрабатываемой заготовки и ограничение длины рабочего хода. Если базирование заготовки осуществляется методом сопряжения, то режуще-формообразующая кромка ориентируется относительно установочных элементов приспособления (рис. 45).

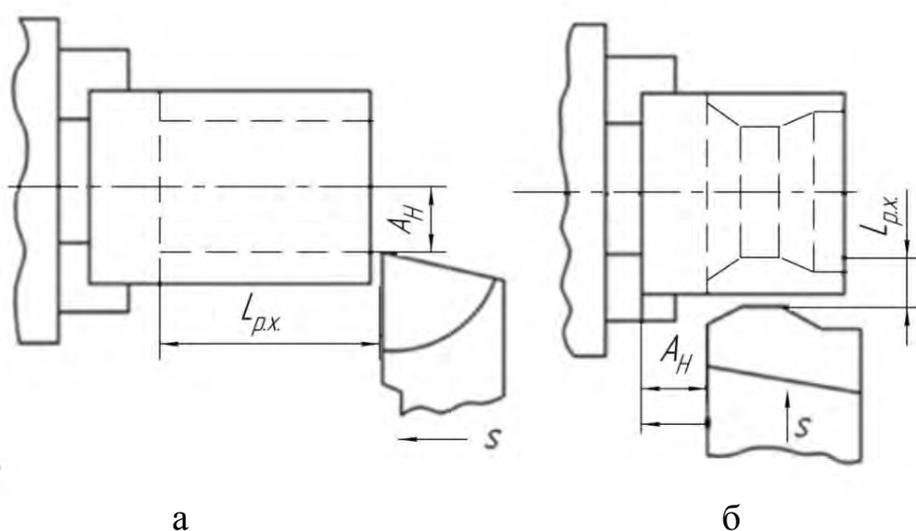


Рисунок 45 – Схема размерной настройки при токарной обработке:

а – с продольной подачей  $s_{\text{прод}}$ , б – с поперечной подачей  $s_{\text{поп}}$ ,

$L_{\text{р.х.}}$  – длина рабочего хода,  $A_{\text{н}}$  – размер настройки

Наиболее простым методом размерной настройки является настройка по эталону (рис. 46). Чтобы повысить точность настройки и не повредить режущую кромку инструмента 3 при его подводе к эталону 2, применяют промежуточный элемент – щуп 4 заданной толщины. Тогда размер эталона (расстояние от установочного элемента) определяется из выражения:

$$A_{\text{эт}} = A_{\text{н}} - b,$$

где  $A_{\text{эт}}$  – размер (высота) эталона,  $A_{\text{н}}$  – размер настройки,  $b$  – толщина щупа.

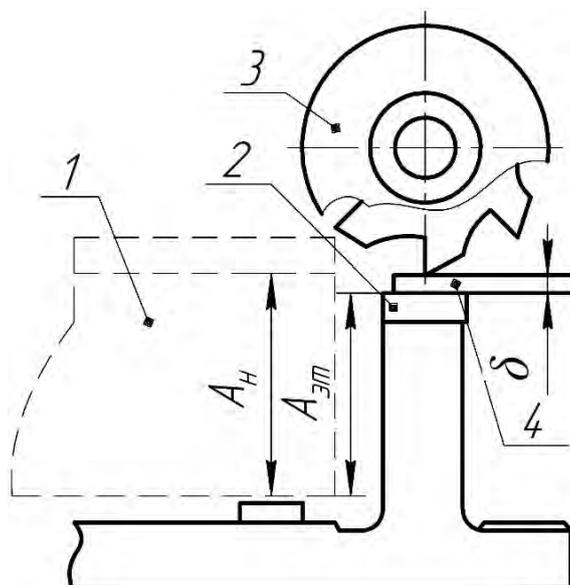


Рисунок 46 – Схема размерной настройки по эталону

В некоторых случаях в качестве начала отсчета при размерной настройке используется технологическая база. Пример такой настройки показан на рисунке 47. Заготовка 1 предварительно базируется и закрепляется на столе 2. При помощи щупа 3 калиброванная оправка 4, установленная в шпиндель станка, фиксируется в начальной позиции. Затем при помощи механизмов ручной подачи стола и бабки шпинделя осуществляется перемещение на расстояния  $x$  и  $y$  для совмещения осей шпинделя ( $O$ ) с осью будущего (расточиваемого) отверстия ( $O_1$ ), где

$$x = A + b + d/2;$$

$$y = B - b - d/2.$$

Отсчет перемещений осуществляется при помощи лимба или набора концевых мер с индикатором.

Пример настройки при обработке отверстия, расположенного под углом к оси другого отверстия, показан на рисунке 48. Заготовка с помощью индикатора базируется и фиксируется на столе координатно-расточного станка таким образом, чтобы ось оправки с шариком и ось заготовки совпали. Далее осуществляется поворот стола на заданный угол  $\alpha$  по отношению к оси шпинделя. Ось шпинделя (при помощи индикатора) устанавливается в нуль относительно шарика оправки. Затем осуществляется отвод стола на расстояние  $x$ , где

$$x = \frac{D}{2} \cos \alpha + (L - a) \sin \alpha$$

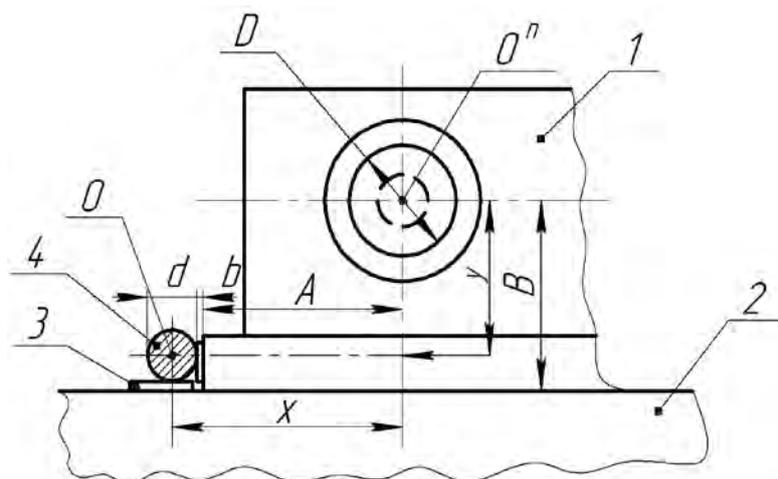


Рисунок 47 – Схема настройки на размеры А и В от технологических баз с помощью шкал и лимбов приводов перемещений горизонтально-расточного станка для растачивания отверстия

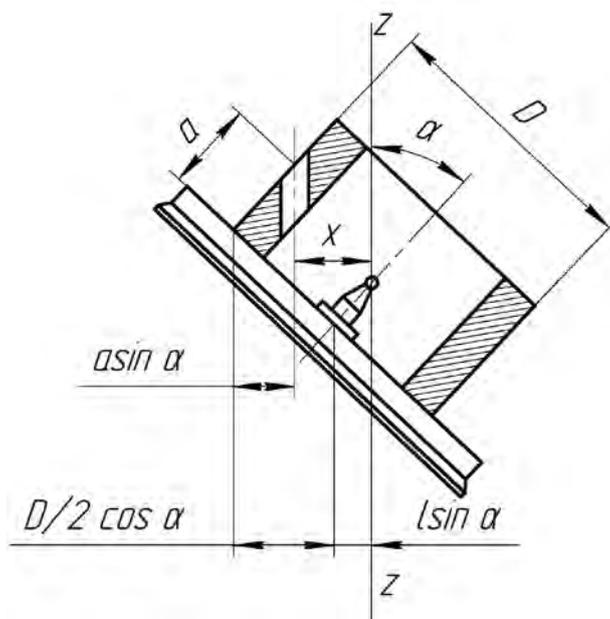


Рисунок 48 – Схема настройки для обработки под углом  $\alpha$  на расстоянии  $a$

При размерной настройке резцов в расточных борштангах применяют эталоны или приборы типа «наездник» (рис. 49). Прибор 1, оснащенный индикатором 3 часового типа, настраивается предварительно по изготовленной для этой цели втулке с наружным диаметром  $d = 2 \cdot A_{\text{н}}$ . Эта втулка по скользящей посадке устанавливается на борштангу. Иногда призма прибора 1 снабжается магнитом, который при необходимости можно выключить. Такой прибор удобнее простого (без магнита). Точность установки резцов по прибору 0,005...0,015 мм. Предварительная размерная настройка инструментов для станков с ЧПУ осуществляется вне станка при помощи оптико-механических приборов.

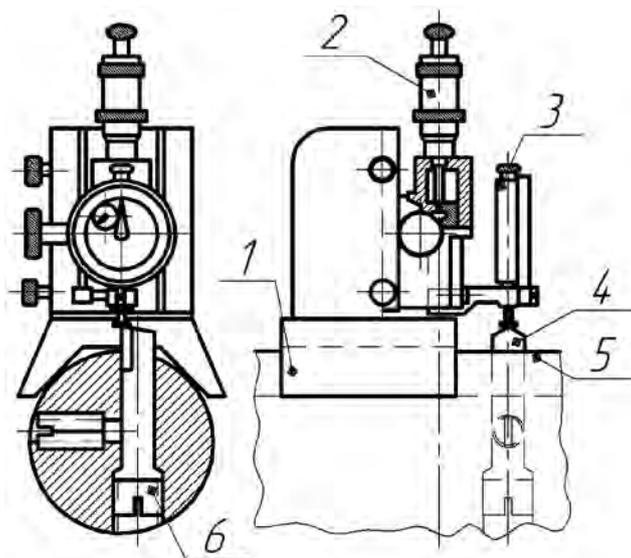


Рисунок 49 – Схема настройки резца на размер растачиваемого отверстия

Некоторые станки с ЧПУ снабжены измерительными преобразователями 2 (рис. 50), которые позволяют осуществить размерную настройку. Для этого каждый из инструментов 1 подводится к измерительному преобразователю 2, который устанавливается на столе станка или на приспособлении с известной высотой  $B_H$ . Система ЧПУ переводится в режим измерения. При отводе шпиндельной бабки в исходное положение системой определяется расстояние  $C_H$ , а следовательно, и  $A_H$  от стола до инструмента. Таким образом, в памяти ЧПУ формируется необходимое перемещение  $z = A_H - A_H$  для выхода на размер настройки  $A_H$ .

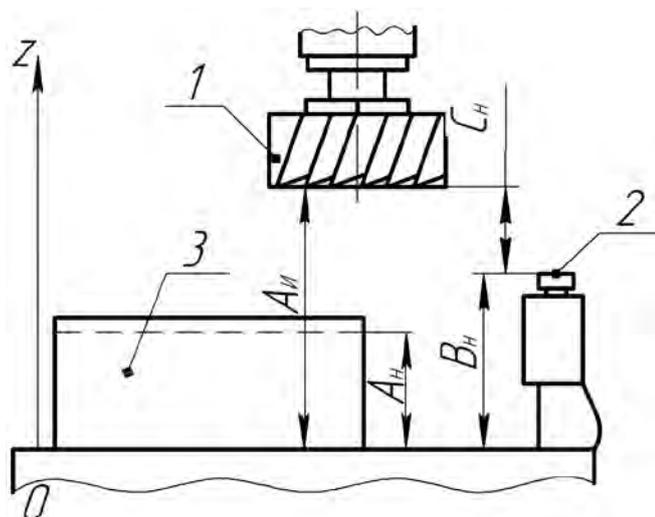


Рисунок 50 – Схема размерной настройки инструментов многоцелевого станка с ЧПУ по оси Z

Все описанные выше методы статической размерной настройки имеют общий недостаток – не учитывают действующие в процессе обработки силы и соответствующие им упругие деформации, вследствие которых фактический размер обработки  $A_{\text{факт}}$  никогда не равен размеру настройки  $A_{\text{н}}$ . Последнее обстоятельство во многих случаях имеет существенное значение. Поэтому статическая настройка дополняется динамической, при которой регулирование положения инструментов и упоров, ограничивающих длину рабочего хода, осуществляется на основании результатов замера первых обработанных заготовок. Во многих случаях сразу осуществляется динамическая размерная настройка без статической.

Различают два вида динамической размерной настройки: *единичная*, когда процедура настройки повторяется при обработке каждой заготовки, и *настройка на партию заготовок*, когда настроенным на размер инструментом обрабатывается партия заготовок, соответствующая периоду его стойкости. Единичная динамическая размерная настройка осуществляется методами «пробной стружки» и «пробных проходов». Пример первого метода, реализуемого на токарном станке, показан на рисунке 51.

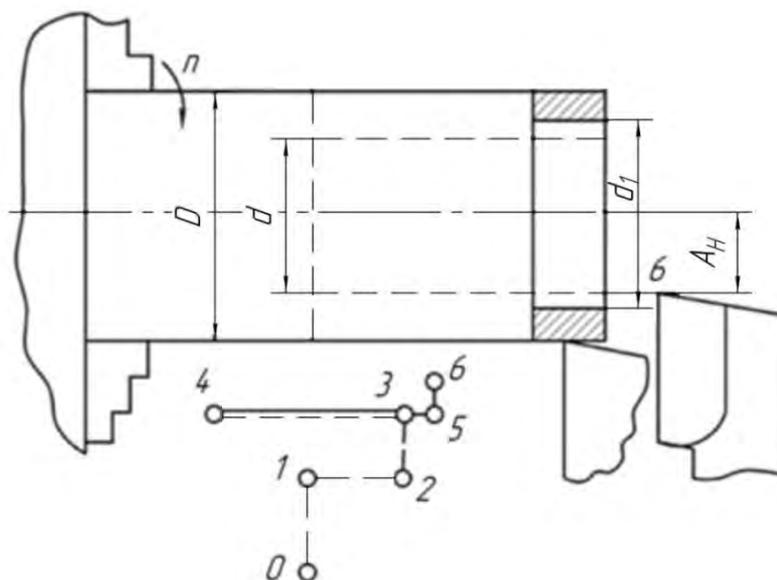


Рисунок 51 – Схема размерной настройки методом «пробной стружки»

После включения вращения шпинделя вершина резца переводится из исходного положения (точка 0) до касания с заготовкой (в точке 1). Затем резец отводится вправо (в точку 2), лимб поперечной подачи устанавливается на нуль и осуществляется переход в точку 3 поперечной подачей на  $(D - d_1) / 2$ . Значение  $d_1$  выбирается согласно неравенству  $d_1 > d$ , где  $d$  – требуемый размер детали. Включается продольная подача, заготовка протачивается на небольшой длине  $L_1$  (переход в точ-

ку 4) и резец ускоренно отводится вправо (в точку 5, которая может совпадать с точкой 3). Вращение шпинделя выключается и осуществляется измерение полученного диаметра  $d_1$ . Снова включается вращение шпинделя, вершина резца перемещается в точку 6 на расстояние  $(d_1-d)/2$  и заготовка обрабатывается на полную длину  $L$ .

Недостатком данного метода является относительно низкая точность. Кроме того, окончательно на участке длиной  $L_1$  получается уменьшенный размер, так как этот участок обрабатывается с меньшей глубиной резания, чем вся остальная заготовка.

Метод «пробных проходов» отличается от метода «пробной стружки» тем, что предварительно обрабатывается не малый участок заготовки, а вся заготовка. Далее, после отвода в точку 5, проводится коррекция размерной настройки (перевод в точку 6) и повторная обработка на всей длине. Последнюю процедуру можно повторять несколько раз, пока не будет достигнут заданный размер. Данный метод обеспечивает высокую точность, ограничиваемую только точностью измерения, точностью регулировки (по лимбу винта подачи или по индикатору часового типа) и минимальной глубиной резания, с которой может работать данный инструмент. Однако при обработке методом «пробных проходов» существенно теряется производительность.

При *динамической размерной настройке на партию* заготовок необходимо обеспечить не только заданную точность, но и максимальную долговечность работы инструмента между коррекциями размерной настройки, которые производятся несколько раз за период его стойкости. Основной причиной, вызывающей необходимость этой коррекции, является износ инструмента, из-за которого размер обработки может систематически увеличиваться (для наружной поверхности) или уменьшаться (для внутренней).

Размерная настройка осуществляется в три этапа: индивидуальная настройка по первой заготовке; обработка пробной партии из  $m = 5...10$  заготовок; анализ результатов измерения деталей пробной партии и первая коррекция размерной настройки с целью так расположить в пределах поля допуска  $TA$  мгновенное поле рассеивания  $\omega A$  размера  $A$ , чтобы получать максимальный запас  $h_n$  на изнашивание инструмента.

На рисунке 52 приведена схема выполнения процедур размерной настройки на партию.

После первой индивидуальной размерной настройки получен размер  $A_1$ , а размеры после обработки  $m$  заготовок пробной партии (включая первую) распределены в пределах от  $A_{\min}$  до  $A_{\max}$ . Тогда средний настраиваемый размер в пробной партии

$$A_{\text{cp}} = \left( \sum_{i=1}^m A_i \right) / m$$

а мгновенное поле рассеяния определяется выражением

$$\omega A = K \cdot (A_{\max} - A_{\min}),$$

где  $K$  зависит от числа заготовок в пробной партии. С вероятностью 95 % можно утверждать, что  $K$  зависит от  $m$  следующим образом:

$m$ , шт....	5	6	7	8	9	10
$K$ .....	1,408	1,296	1,215	1,152	1,104	1,066

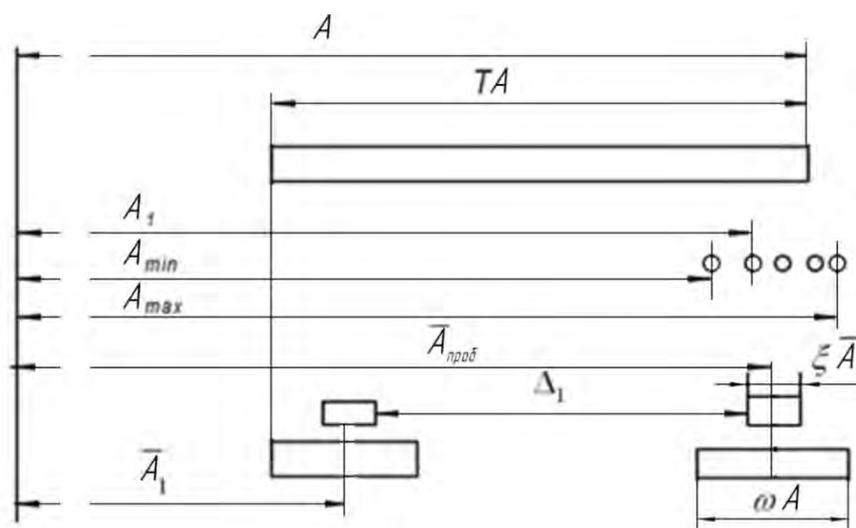


Рисунок 52 – Схема определения и смещения мгновенного поля рассеяния при размерной настройке на партию

Доверительный интервал  $\xi \bar{A}$  для оценки  $A_{\text{проб}}$  определяется выражением

$$\xi \bar{A} = K_1 \cdot \omega A / \sqrt{m'}$$

где с вероятностью 95 %  $K_1$  зависит от  $m'$  следующим образом

$m'$ , шт....	5	6	7	8	9	10
$K_1$ .....	1,789	1,590	1,434	1,331	1,252	1,191

В соответствии со схемой на рисунке 52 необходимая коррекция, при условии, что по мере изнашивания инструмента размер обработки увеличивается, определяется из следующего выражения

$$\Delta_1 = \bar{A}_{\text{проб}} - A + TA - 0,5\omega A - \xi \bar{A}.$$

Полученный уровень настройки характеризуется параметром  $\bar{A}_1$ , то есть средним значением размера  $A$  в партии из  $m$  деталей, обработанных сразу после осуществления первой коррекции. Относительная точность размерной настройки на партию характеризуется показателем уровня настройки  $K_H$ :

$$K_H = (\bar{A}_{1зд} - \bar{A}_1) / TA,$$

где  $\bar{A}_{1зд}$  – заданный размер настройки.

По мере изнашивания инструмента уровень настройки будет смещаться от  $\bar{A}_1$  до предельного значения  $\bar{A}_{пред}$  (рис. 53). С учетом допуска  $T_H$  на размерную настройку запас допуска  $h_n$  на изнашивание определяется следующим выражением

$$h_n = TA - T_H - \omega A - \xi \bar{A}.$$

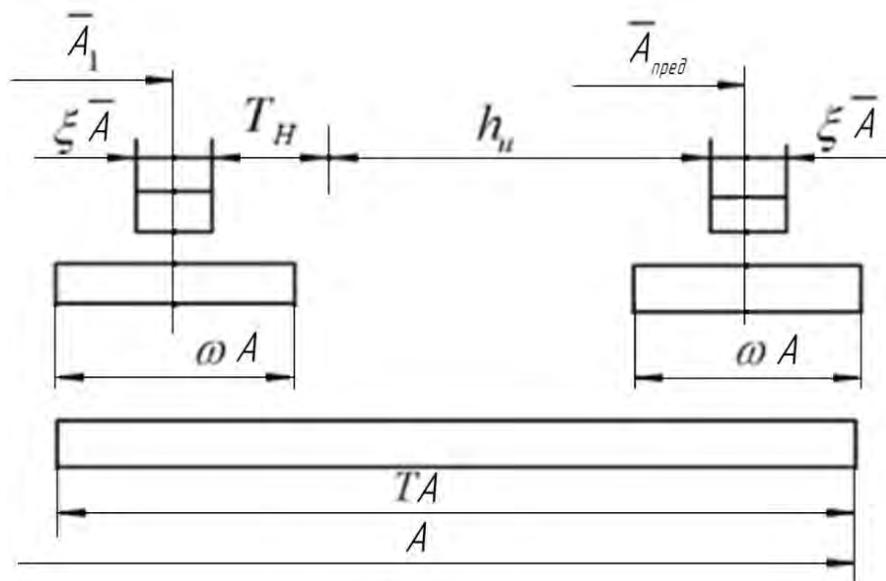


Рисунок 53 – Схема смещения мгновенного поля рассеяния при износе инструмента

При увеличении допуска  $T_H$  на размерную настройку затраты времени  $t_n$  на промежуточные коррекции будут, как показали эксперименты, сокращаться в соответствии с выражением

$$\tau_n = B_0 T_H^{-b},$$

где  $B_0$  – коэффициент;  $b = 0,65...0,75$ . Однако при этом увеличение  $T_n$  ведет к уменьшению запаса на износ  $h_{и}$ . Следовательно, придется чаще проводить промежуточные коррекции. Очевидно, что существует оптимальная точность размерной настройки, при которой суммарное время  $t_{сум}$  на промежуточные коррекции будет минимальным.

## 4.2 Размерная настройка при фрезеровании плоских поверхностей на станках с ЧПУ

### 4.2.1 Методическое и математическое обеспечение расчета параметров размерной настройки концевых фрез

При формировании общих моделей для определения затрат основного (машинного) времени установлено, что принципиальное отличие имеют варианты врезания (выхода) фрез либо по прямой (расположенной перпендикулярно направлению подачи или под произвольным углом), либо по окружности. Прочие варианты могут быть к ним приведены. Основными плоскими конструктивными элементами обрабатываемыми фрезами являются плоскости, полуоткрытые и открытые прямые и наклонные уступы, а также открытые, полуоткрытые и закрытые пазы.

Построены общие расчетные схемы для определения длины рабочего хода инструмента  $L_{рх}$ , величины врезания  $L_{вр}$ , а также координат начального ( $X_n$  и  $Y_n$ ) и конечного ( $X_k$  и  $Y_k$ ) положения инструмента относительно системы координат заготовки (рис. 54).

Показателями режима резания при обработке фрезами являются: глубина резания  $t$ , скорость подачи  $S_m$  (мм/мин) и частота вращения шпинделя  $n$  (об/мин). Глубина резания для всех видов фрез, кроме торцовых и шпоночных, измеряется в плоскости, перпендикулярной к оси фрезы. Важное значение при фрезеровании имеют такие технологические параметры, как ширина фрезерования  $B$  и глубина срезаемого слоя  $t_o$ . В справочниках и онлайн-калькуляторах обычно рекомендуются подачи  $S_z$  – на один зуб фрезы (при предварительной обработке) или  $S_o$  – на один оборот фрезы, а также скорость резания  $v$ , м/мин. Все виды подач при фрезеровании связаны между собой следующими выражениями  $S_o = S_z \cdot Z$ ;  $S_m = n \cdot S_o = n \cdot Z \cdot S_z$ , где  $Z$  – число зубьев фрезы.

Так на основании принятых обозначений можно определить затраты основного времени  $T_o$  на операцию:

$$T_o = \sum_{i=1}^{N1} \sum_{j=1}^{N2} \left( \frac{L_{врij}}{S_{m1ij}} + \frac{L_{рхij} - L_{врij}}{S_{m2ij}} \right),$$

где  $L_{epij}$  – величина врезания на соответствующем проходе;  $L_{pxij}$  – величина рабочего хода на соответствующем проходе;  $S_{m1ij}$  – минутная подача при врезании на соответствующем проходе;  $S_{m2ij}$  – минутная подача при устойчивом резании на соответствующем проходе;  $N1$  и  $N2$  – числа проходов в соответствующих координатных направлениях.

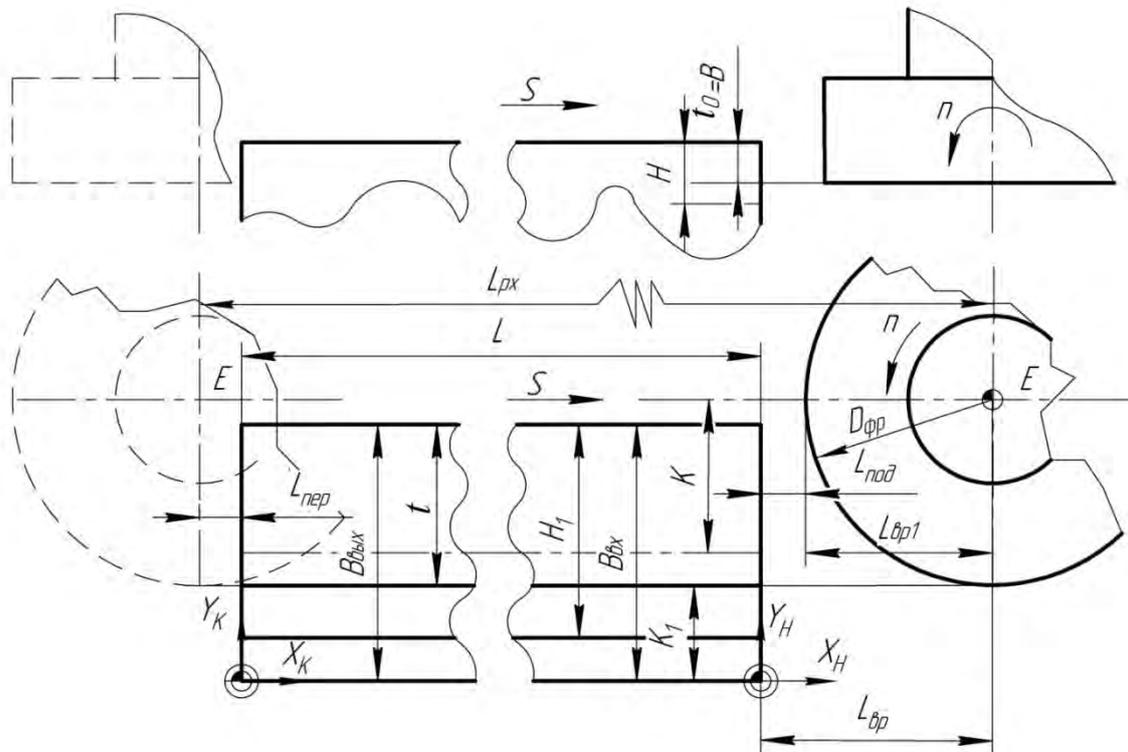


Рисунок 54 – Общая принципиальная расчетная схема для определения величин рабочего хода и врезания, а так же координат начального и конечного положения фрезы при несимметричном врезании и выходе по прямой перпендикулярно направлению подачи

«Потолки значений» числа проходов (означает, что полученная величина округляется до ближайшего большего значения):

$$N1 = \left\lceil \frac{H_1}{t} \right\rceil; N2 = \left\lceil \frac{H}{t_o} \right\rceil$$

где  $H_1$  – припуск по оси  $Y$ ;  $t$  – глубина резания;  $H$  – припуск по оси  $Z$ ;  $t_o$  – глубина срезаемого слоя.

При расчетах рекомендуется скорректировать значение глубин, таким образом, чтобы они были равны на всех проходах. Иначе на последнем проходе она будет меньше чем на предыдущих. В этом случае глубины на последнем проходе:

$$t = H_1 - t \left[ \frac{H_1}{t} \right]; t = H - t_o \left[ \frac{H}{t_o} \right].$$

Длины рабочих ходов:

$$L_{px} = L + L_1 + X_n - X_k + L_{nep},$$

где  $L$  – расстояние между началами систем координат заготовки (при прямолинейной траектории совпадает с габаритным размером);  $L_1$  – длина траектории отличной от прямолинейной;  $L_{nep}$  – длина перебега (принимается 2...3 мм или отсутствует (в случае обработки полуоткрытых поверхностей)).

Для фрезерования концевыми фрезами величина врезания складывается из двух компонентов (рис. 54):

$$L_{ep} = L_{ep1} + L_{nod},$$

где  $L_{ep1}$  – обусловлена отношением диаметра фрезы  $D_{fp}$ , ширины заготовки на входе  $B_{ex}$  (или радиуса  $R_{ex}$ ), симметричностью их расположения  $K$  и углом  $\alpha$ ;  $L_{nod}$  – величина минимального безопасного подвода инструмента (принимается 2...3 мм).

Установлено, что различные сочетания значений диаметра фрезы  $D_{fp}$ , ширины  $B_{ex}$  (радиуса  $R_{ex}$ ) заготовки, симметричности их расположения  $K$  и угла врезания  $\alpha$  задают положения начал системы координат ( $X_n, Y_n$ ) инструмента относительно системы координат заготовки 15 различными способами. Эти способы определяют варианты схем для их определения, а также модели для расчета величин врезания.

Так при несимметричном врезании по прямой если  $D_{fp} > B_{ex}$ ,  $D_{fp}/2 > B_{ex}/2 + K, K \leq B_{ex}/2, K \neq 0$  и  $\alpha = 90^\circ$  (рис. 55 а):

$$L_{ep1} = \left( \frac{D_{fp}}{2} - AC \right).$$

Из  $\Delta AOC$

$$AO = \frac{D_{fp}}{2}, OC = \frac{B_{ex}}{2} + K, AC = \sqrt{\left( \frac{D_{fp}}{2} \right)^2 - \left( \frac{B_{ex}}{2} + K \right)^2}.$$

Тогда

$$L_{\text{вп1}} = \left( \frac{D_{\text{фр}}}{2} - \sqrt{\left( \frac{D_{\text{фр}}}{2} \right)^2 - \left( \frac{B_{\text{вх}}}{2} + K \right)^2} \right); X_{\text{н}} = L_{\text{нод}} + \frac{D_{\text{фр}}}{2}; Y_{\text{н}} = \frac{B_{\text{вх}}}{2} + K.$$

При несимметричном врезании по прямой если  $B_{\text{вх}} / 2 < D_{\text{фр}} \leq B_{\text{вх}}$ ,  $K > B_{\text{вх}} / 2$  и  $\alpha = 90^\circ$  (рис. 55 б):

$$L_{\text{вп1}} = AC$$

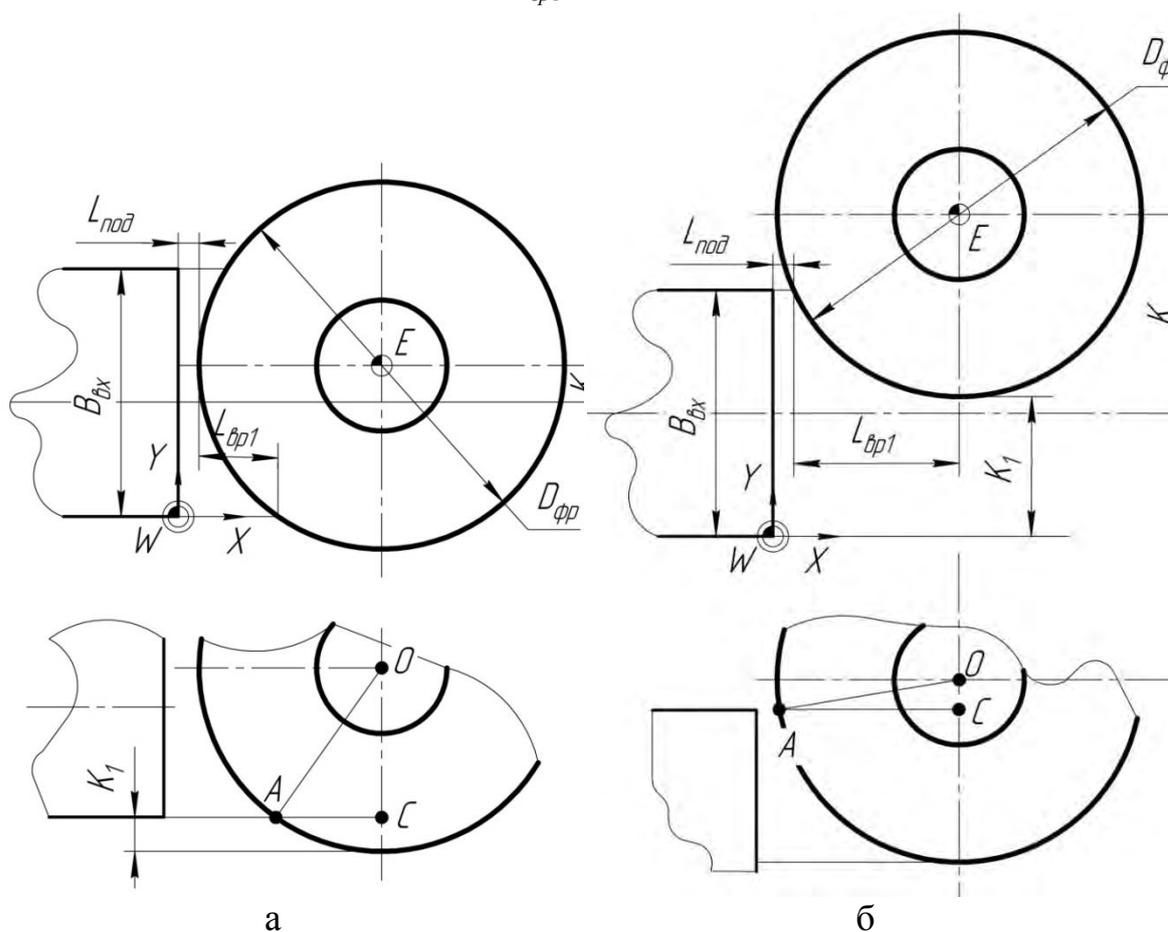


Рисунок 55 – Расчетные схемы для определения  $L_{\text{вп1}}$  и координат  $(X_{\text{н}}, Y_{\text{н}})$  для некоторых вариантов несимметричного врезания концевой фрезой по прямой

Из  $\triangle AOC$

$$AO = \frac{D_{\text{фр}}}{2}; OC = K - \frac{B_{\text{вх}}}{2}; AC = \sqrt{\left( \frac{D_{\text{фр}}}{2} \right)^2 - \left( K - \frac{B_{\text{вх}}}{2} \right)^2}.$$

Тогда

$$L_{\text{сп1}} = \sqrt{\left(\frac{D_{\text{фр}}}{2}\right)^2 - \left(K - \frac{B_{\text{ex}}}{2}\right)^2};$$

$$X_{\text{н}} = L_{\text{под}} + \sqrt{\left(\frac{D_{\text{фр}}}{2}\right)^2 - \left(K - \frac{B_{\text{ex}}}{2}\right)^2}; Y_{\text{н}} = \frac{B_{\text{ex}}}{2} + K.$$

При несимметричном врезании по окружности если  $D_{\text{фр}} > R_{\text{ex}}$ ,  $D_{\text{фр}} / 2 - K < R_{\text{ex}}$ ,  $K \neq 0$  и  $\alpha = 90^\circ$  (рис. 56 а):

$$L_{\text{сп1}} = O_1H - O_1Z.$$

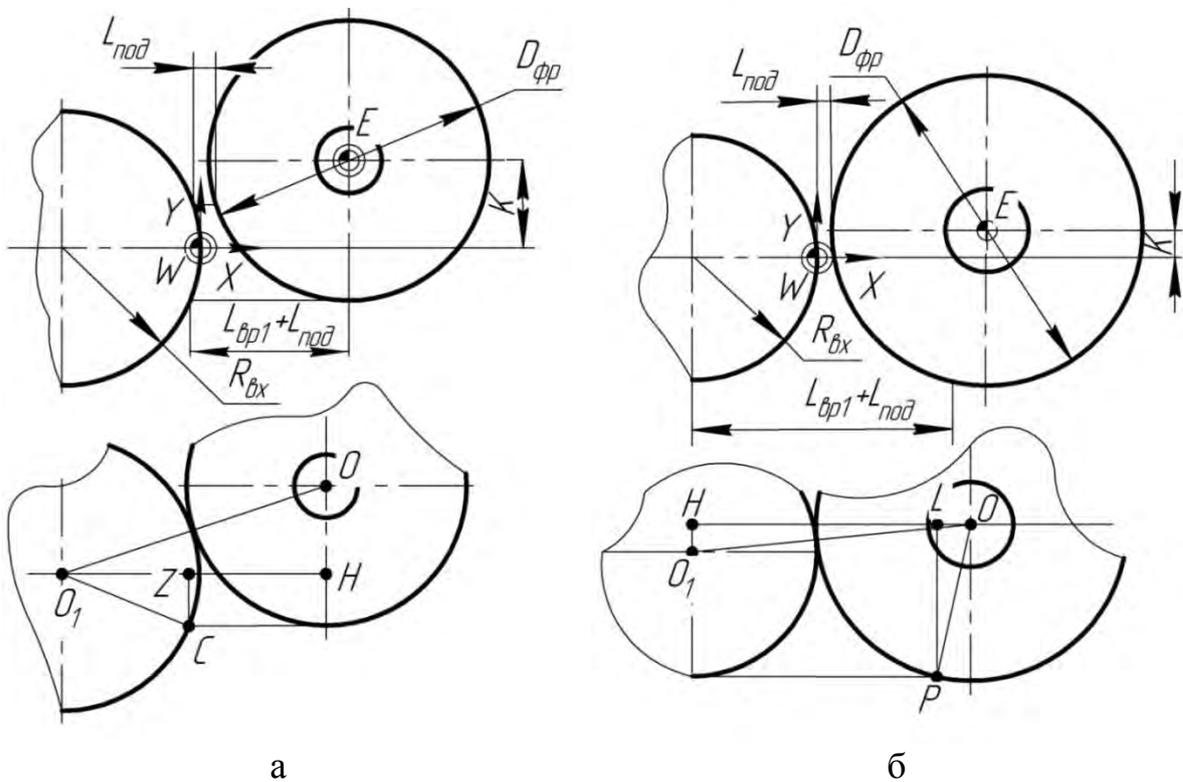


Рисунок 56 – Расчетные схемы для определения  $L_{\text{сп1}}$  и координат ( $X_{\text{н}}$ ,  $Y_{\text{н}}$ ) для некоторых вариантов несимметричного врезания концевой фрезой по окружности

Из  $\triangle O_1OH$

$$O_1O = R_{\text{ex}} + \frac{D_{\text{фр}}}{2}; OH = K; O_1H = \sqrt{O_1O^2 - OH^2} = \sqrt{\left(R_{\text{ex}} + \frac{D_{\text{фр}}}{2}\right)^2 - K^2}.$$

Из  $\Delta O_1CZ$

$$O_1C = R_{\text{ex}}; CZ = \frac{D_{\text{фп}}}{2} - K; O_1Z = \sqrt{O_1C^2 - CZ^2} = \sqrt{R_{\text{ex}}^2 - \left(\frac{D_{\text{фп}}}{2} - K\right)^2}.$$

Тогда

$$L_{\text{эп1}} = \sqrt{\left(R_{\text{ex}} + \frac{D_{\text{фп}}}{2}\right)^2 - K^2} - \sqrt{R_{\text{ex}}^2 - \left(\frac{D_{\text{фп}}}{2} - K\right)^2},$$

$$X_{\text{н}} = L_{\text{нод}} + O_1H - R_{\text{ex}} = L_{\text{нод}} + \sqrt{\left(R_{\text{ex}} + \frac{D_{\text{фп}}}{2}\right)^2 - K^2} - R_{\text{ex}}; Y_{\text{н}} = K.$$

При несимметричном врезании по окружности если  $D_{\text{фп}} > R_{\text{ex}}$ ,  $D_{\text{фп}} - K > R_{\text{ex}}$ ,  $K \neq 0$  и  $\alpha = 90^\circ$  (рис. 56 б)

$$L_{\text{эп1}} = OH - OL.$$

Из  $\Delta O_1OH$

$$O_1O = R_{\text{ex}} + \frac{D_{\text{фп}}}{2}; O_1H = K; OH = \sqrt{O_1O^2 - O_1H^2} = \sqrt{\left(R_{\text{ex}} + \frac{D_{\text{фп}}}{2}\right)^2 - K^2}.$$

Из  $\Delta OPL$

$$OP = \frac{D_{\text{фп}}}{2}; PL = R_{\text{ex}} + K; OL = \sqrt{OP^2 - PL^2} = \sqrt{D_{\text{фп}}^2 - (R_{\text{ex}} + K)^2}.$$

Тогда

$$L_{\text{эп1}} = \sqrt{\left(R_{\text{ex}} + \frac{D_{\text{фп}}}{2}\right)^2 - K^2} - \sqrt{D_{\text{фп}}^2 - (R_{\text{ex}} + K)^2},$$

$$X_{\text{н}} = L_{\text{нод}} + OH - R_{\text{ex}} = L_{\text{нод}} + \sqrt{\left(R_{\text{ex}} + \frac{D_{\text{фп}}}{2}\right)^2 - K^2} - R_{\text{ex}}; Y_{\text{н}} = K.$$

При врезании под углом к плоской поверхности (рис. 57):

$$L_{\text{эп1}} = O'B + BO.$$

Из  $\triangle AO'B$

$$O'B = \frac{O'A}{\operatorname{tg} \alpha} = \frac{D_{\phi p} \operatorname{tg} \alpha}{2}.$$

Из  $\triangle BCO$

$$BO = \frac{OC}{\sin \alpha} = \frac{D_{\phi p} \sin \alpha}{2}.$$

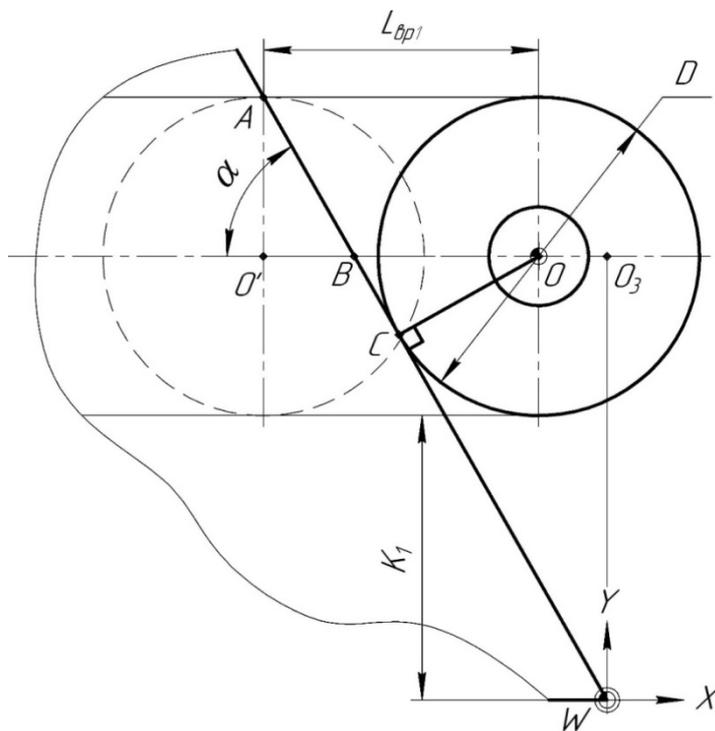


Рисунок 57 – Расчетная схема для определения  $L_{\phi p 1}$  и координат  $(X_n, Y_n)$  при врезании под углом к плоской поверхности

$$L_{\phi p 1} = \frac{D_{\phi p} \operatorname{tg} \alpha + D_{\phi p} \sin \alpha}{2} = \frac{D_{\phi p}}{2} (\operatorname{tg} \alpha + \sin \alpha),$$

$$X_n = OO_3 = O_3B - BO + L_{\text{нод}}.$$

Из  $\triangle BO_2W$

$$WO_2 = K_1 + \frac{D_{\phi p}}{2}; WB = \frac{WO_2}{\operatorname{tg} \alpha} = \frac{K_1 + \frac{D_{\phi p}}{2}}{\operatorname{tg} \alpha},$$

$$X_H = \frac{K_1 + \frac{D_{\phi p}}{2}}{\operatorname{tg} \alpha} - \frac{D_{\phi p} \sin \alpha}{2} + L_{\text{нод}}; Y_H = K_1 + \frac{D_{\phi p}}{2}.$$

Результаты моделирования приведены в таблицах 16 и 17.

Таблица 16 – Модели для определения начальных координат и величины врезания при врезании фрезы в заготовку по прямой

Условие применения	Величина врезания $L_{\text{вп}}$	Координаты $X_H$ и $Y_H$
$D_{\phi p} < B_{\text{ex}}; K = 0;$ $\alpha = 90^\circ$	$L_{\text{вп}} = \frac{D_{\phi p}}{2} + L_{\text{нод}};$	$X_H = L_{\text{нод}} + \frac{D_{\phi p}}{2}; Y_H = \frac{B_{\text{ex}}}{2}$
$D_{\phi p} > B_{\text{ex}}; K = 0;$ $\alpha = 90^\circ$	$L_{\text{вп}} = L_{\text{нод}} +$ $+\left(\frac{D_{\phi p}}{2} - \sqrt{\left(\frac{D_{\phi p}}{2}\right)^2 - \left(\frac{B_{\text{ex}}}{2}\right)^2}\right)$	$X_H = L_{\text{нод}} + \frac{D_{\phi p}}{2}; Y_H = \frac{B_{\text{ex}}}{2}$
$D_{\phi p} < \frac{B_{\text{ex}}}{2}; \alpha = 90^\circ$ $\frac{D_{\phi p}}{2} \leq K \leq \frac{B_{\text{ex}}}{2};$	$L_{\text{вп}} = \frac{D_{\phi p}}{2} + L_{\text{нод}}$	$X_H = L_{\text{нод}} + \frac{D_{\phi p}}{2}; Y_H = \frac{B_{\text{ex}}}{2} + K$
$\frac{B_{\text{ex}}}{2} < D_{\phi p} \leq B_{\text{ex}};$ $K \leq \frac{B_{\text{ex}}}{2}; \alpha = 90^\circ$	$L_{\text{вп}} = \frac{D_{\phi p}}{2} + L_{\text{нод}}$	$X_H = L_{\text{нод}} + \frac{D_{\phi p}}{2}; Y_H = \frac{B_{\text{ex}}}{2} + K$
$D_{\phi p} > B_{\text{ex}};$ $\frac{D_{\phi p}}{2} > \frac{B_{\text{ex}}}{2} + K;$ $K \leq \frac{B_{\text{ex}}}{2}; K \neq 0;$ $\alpha = 90^\circ$	$L_{\text{вп}} = L_{\text{нод}} +$ $+\left(\frac{D_{\phi p}}{2} - \sqrt{\left(\frac{D_{\phi p}}{2}\right)^2 - \left(\frac{B_{\text{ex}}}{2} + K\right)^2}\right)$	$X_H = L_{\text{нод}} + \frac{D_{\phi p}}{2}; Y_H = \frac{B_{\text{ex}}}{2} + K$
$D_{\phi p} < \frac{B_{\text{ex}}}{2}$ или $\frac{B_{\text{ex}}}{2} < D \leq B_{\text{ex}};$ $K > \frac{B_{\text{ex}}}{2}; \alpha = 90^\circ$	$L_{\text{вп}} = L_{\text{нод}} +$ $+\sqrt{\left(\frac{D_{\phi p}}{2}\right)^2 - \left(K - \frac{B_{\text{ex}}}{2}\right)^2}$	$X_H = L_{\text{нод}} + \sqrt{\left(\frac{D_{\phi p}}{2}\right)^2 - \left(K - \frac{B_{\text{ex}}}{2}\right)^2};$ $Y_H = \frac{B_{\text{ex}}}{2} + K$
$\alpha \neq 90^\circ$	$L_{\text{вп}} = L_{\text{нод}} + \frac{D_{\phi p}}{2}(\operatorname{tg} \alpha + \sin \alpha)$	$X_H = L_{\text{нод}} + \frac{K_1 + \frac{D}{2}}{\operatorname{tg} \alpha} - \frac{D_{\phi p} \cdot \sin \alpha}{2};$ $Y_H = K_1 + \frac{D_{\phi p}}{2}$

Таблица 17 – Модели для определения начальных координат и величины врезания при врезании фрезы в заготовку по окружности

Условие применения	Величина врезания $L_{\text{вп}}$	Координаты $X_H$ и $Y_H$
$D_{\text{фп}} < 2R_{\text{ex}}; K = 0$	$L_{\text{вп}} = L_{\text{нод}} + (D_{\text{фп}} / 2) +$ $+ \left( R_{\text{ex}} - \sqrt{(R_{\text{ex}})^2 - \left( \frac{D_{\text{фп}}}{2} \right)^2} \right)$	$X_H = L_{\text{нод}} + \frac{D_{\text{фп}}}{2}$ $Y_H = K$
$D_{\text{фп}} > 2R_{\text{ex}}; K = 0$	$L_{\text{вп}} = L_{\text{нод}} + R_{\text{ex}} +$ $+ \left( \frac{D_{\text{фп}}}{2} - \sqrt{\left( \frac{D_{\text{фп}}}{2} \right)^2 - (R_{\text{ex}})^2} \right)$	$X_H = L_{\text{нод}} + \frac{D_{\text{фп}}}{2}$ $Y_H = K$
$D_{\text{фп}} < R_{\text{ex}};$ $\frac{D_{\text{фп}}}{2} + K < R_{\text{ex}};$ $K \neq 0$	$L_{\text{вп}} = L_{\text{нод}} + \sqrt{\left( R_{\text{ex}} + \frac{D_{\text{фп}}}{2} \right)^2 - K^2} -$ $- \sqrt{(R_{\text{ex}})^2 - \left( \frac{D_{\text{фп}}}{2} + K \right)^2}$	$X_H = L_{\text{нод}} +$ $+ \left( \sqrt{\left( R_{\text{ex}} + \frac{D_{\text{фп}}}{2} \right)^2 - K^2} - R_{\text{ex}} \right)$ $Y_H = K$
$D_{\text{фп}} > R_{\text{ex}};$ $\frac{D_{\text{фп}}}{2} - K < R_{\text{ex}};$ $K \neq 0$	$L_{\text{вп}} = L_{\text{нод}} + \sqrt{\left( R_{\text{ex}} + \frac{D_{\text{фп}}}{2} \right)^2 - K^2} -$ $- \sqrt{R_{\text{ex}}^2 - \left( \frac{D_{\text{фп}}}{2} - K \right)^2}$	$X_H = L_{\text{нод}} +$ $+ \left( \sqrt{\left( R_{\text{ex}} + \frac{D_{\text{фп}}}{2} \right)^2 - K^2} - R_{\text{ex}} \right)$ $Y_H = K$
$D_{\text{фп}} > R_{\text{ex}};$ $\frac{D_{\text{фп}}}{2} - K > R_{\text{ex}}; K \neq 0$	$L_{\text{вп}} = L_{\text{нод}} + \sqrt{\left( R_{\text{ex}} + \frac{D_{\text{фп}}}{2} \right)^2 - K^2} -$ $- \sqrt{R_{\text{ex}}^2 - (R_{\text{ex}} + K)^2}$	$X_H = L_{\text{нод}} +$ $+ \left( \sqrt{\left( R_{\text{ex}} + \frac{D_{\text{фп}}}{2} \right)^2 - K^2} - R_{\text{ex}} \right)$ $Y_H = K$
$D_{\text{фп}} < 2R_{\text{ex}};$ $K > R_{\text{ex}}$	$L_{\text{вп}} = L_{\text{нод}} + \sqrt{\left( R_{\text{ex}} + \frac{D_{\text{фп}}}{2} \right)^2 - K^2} -$ $- \sqrt{R_{\text{ex}}^2 - \left( K - \frac{D_{\text{фп}}}{2} \right)^2}$	$X_H = \left  R_{\text{ex}} - \sqrt{\left( R_{\text{ex}} + \frac{D_{\text{фп}}}{2} \right)^2 - K^2} + \right.$ $\left. + L_{\text{нод}} \right $ $Y_H = K$
$D_{\text{фп}} > 2R_{\text{ex}};$ $K > R_{\text{ex}}$	$L_{\text{вп}} = L_{\text{нод}} + \sqrt{\left( R_{\text{ex}} + \frac{D_{\text{фп}}}{2} \right)^2 - K^2} -$ $- \sqrt{R_{\text{ex}}^2 - \left( K - \frac{D_{\text{фп}}}{2} \right)^2}$	$X_H = \sqrt{\left( R_{\text{ex}} + \frac{D_{\text{фп}}}{2} \right)^2 - K^2} -$ $- R_{\text{ex}} + L_{\text{нод}}$ $Y_H = K$

Для определения координат конечных положений фрез ( $X_K$  и  $Y_K$ ) также составлены расчетные схемы и построены математические модели.

Так при симметричном врезании по прямой если  $D_{фр} > B_{вых}$ ,  $K = 0$  и  $\alpha = 90^\circ$  (рис. 58 а):

$$X_k = CO - L_{пер}.$$

Из  $\Delta OCC$

$$OB = \frac{D_{фр}}{2}; CB = \frac{B_{вых}}{2};$$

$$CO = \sqrt{OB^2 - CB^2} = \sqrt{\left(\frac{D_{фр}}{2}\right)^2 - \left(\frac{B_{вых}}{2}\right)^2};$$

$$X_k = \sqrt{\left(\frac{D_{фр}}{2}\right)^2 - \left(\frac{B_{вых}}{2}\right)^2} - L_{пер}; Y_k = \frac{B_{вых}}{2}.$$

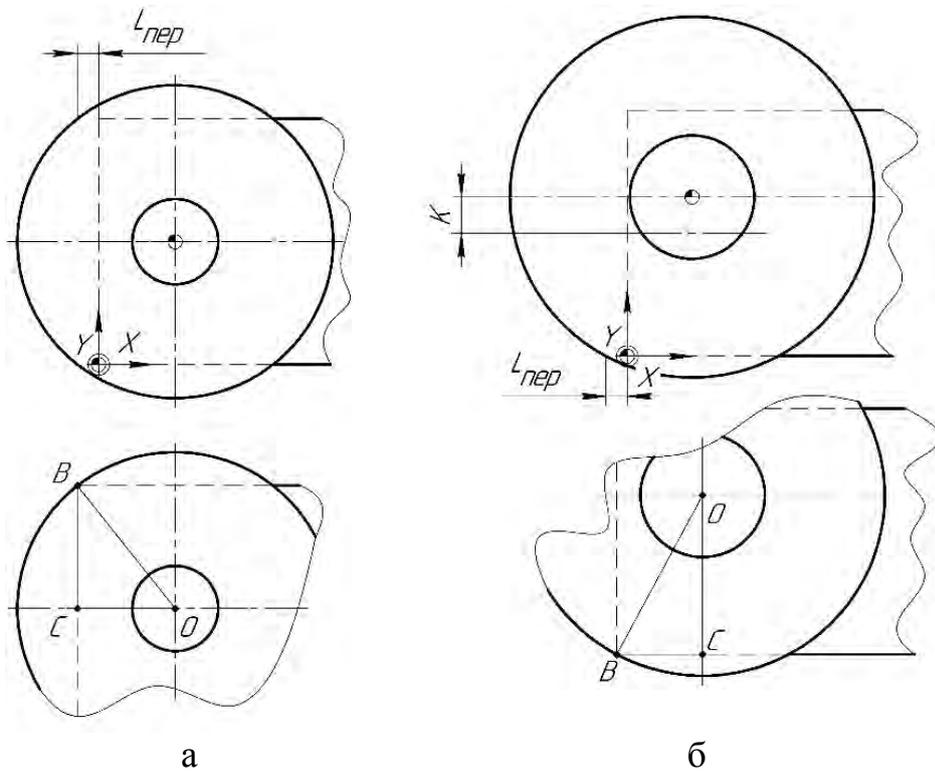


Рисунок 58 – Расчетные схемы для определения координат  $X_k$  и  $Y_k$  для некоторых вариантов выхода концевой фрезы по прямой

При несимметричном выходе фрезы по прямой если  $D_{фр} > B_{вых}$ ,  $D_{фр} / 2 > B_{вых} / 2 + K$ ,  $K \leq B_{вых} / 2$ ,  $K \neq 0$  и  $\alpha = 90^\circ$  (рис. 58 б):

$$X_k = BC - L_{пер}.$$

Из  $\triangle OBC$

$$OC = \frac{B_{\text{вых}}}{2} + K; OB = \frac{D_{\text{фр}}}{2};$$

$$BC = \sqrt{OB^2 - OC^2} = \sqrt{\left(\frac{D_{\text{фр}}}{2}\right)^2 - \left(\frac{B_{\text{вых}}}{2}\right)^2};$$

$$X_{\kappa} = \sqrt{\left(\frac{D}{2}\right)^2 - \left(\frac{B_{\text{вых}}}{2} + K\right)^2} - L_{\text{пер}}; Y_{\kappa} = \frac{B_{\text{вых}}}{2} + K.$$

При симметричном выходе фрезы по окружности если  $D_{\text{фр}} < 2R_{\text{вых}}$ ,  $K = 0$  (рис. 59 а):

$$X_{\kappa} = R_{\text{вых}} - O_1C - L_{\text{пер}}.$$

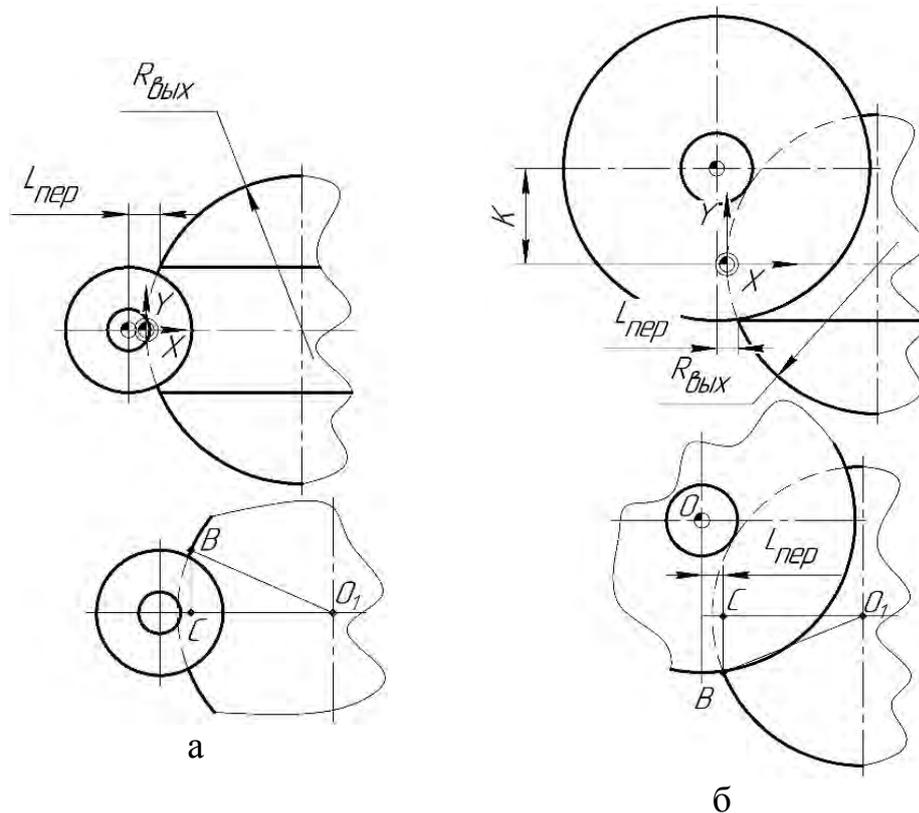


Рисунок 59 – Расчетные схемы для определения координат  $X_{\kappa}$  и  $Y_{\kappa}$  для некоторых вариантов выхода концевой фрезы по окружности

Из  $\triangle O_1CB$

$$O_1B = R_{\text{вых}}; CB = \frac{D_{\text{фр}}}{2};$$

$$O_1C = \sqrt{O_1B^2 - CB^2} = \sqrt{R_{\text{выл}}^2 - \left(\frac{D_{\text{фр}}}{2}\right)^2};$$

$$X_{\kappa} = R_{\text{выл}} - \sqrt{R_{\text{выл}}^2 - \left(\frac{D_{\text{фр}}}{2}\right)^2} - L_{\text{неп}}; Y_{\kappa} = 0.$$

При несимметричном выходе фрезы по окружности если  $D_{\text{фр}} > 2R_{\text{выл}}$ ,  $D_{\text{фр}}/2 > 2R_{\text{выл}}/2 + K$ ,  $K \leq 2R_{\text{выл}}/2$  и  $K \neq 0$  (рис. 59 б):

$$X_{\kappa} = R_{\text{выл}} - O_1C - L_{\text{неп}}.$$

Из  $\Delta O_1CB$

$$OB = R_{\text{выл}}; CB = \frac{D_{\text{фр}}}{2} - K;$$

$$O_1C = \sqrt{O_1B^2 - CB^2} = \sqrt{R_{\text{выл}}^2 - \left(\frac{D_{\text{фр}}}{2} - K\right)^2};$$

$$X_{\kappa} = R_{\text{выл}} - \sqrt{R_{\text{выл}}^2 - \left(\frac{D_{\text{фр}}}{2} - K\right)^2} - L_{\text{неп}}; Y_{\kappa} = K.$$

Таким образом, сформирован массив моделей для определения координат конечных положений фрезы (табл. 18), а также определены возможные варианты сочетаний входов и выходов фрезы.

Таблица 18 – Фрагмент таблицы моделей для определения координат конечных положений фрез

Условие применения	Координаты $X_{\kappa}$ и $Y_{\kappa}$
$D_{\text{фр}} < B_{\text{ex}}; K = 0;$ $\alpha = 90^\circ$	$X_{\kappa} = -L_{\text{неп}}; Y_{\kappa} = \frac{B_{\text{выл}}}{2}.$
$D_{\text{фр}} > B_{\text{ex}}; K = 0;$ $\alpha = 90^\circ$	$X_{\kappa} = \sqrt{\left(\frac{D_{\text{фр}}}{2}\right)^2 - \left(\frac{B_{\text{выл}}}{2}\right)^2} - L_{\text{неп}}; Y_{\kappa} = \frac{B_{\text{выл}}}{2}.$
$D_{\text{фр}} < \frac{B_{\text{ex}}}{2}; \frac{D_{\text{фр}}}{2} \leq K \leq \frac{B_{\text{ex}}}{2};$ $\alpha = 90^\circ$	$X_{\kappa} = -L_{\text{неп}}; Y_{\kappa} = \frac{B_{\text{выл}}}{2} + K$
...	...

## 4.2.2 Особенности моделирования параметров размерной настройки торцевых фрез

Для фрезерования торцевыми фрезами также построены общие расчетные схемы для определения длины рабочего хода инструмента  $L_{рх}$ , величины врезания  $L_{вр}$ , также координат начального ( $X_H$  и  $Y_H$ ) и конечного ( $X_K$  и  $Y_K$ ) положения инструмента относительно системы координат заготовки (рис. 60).

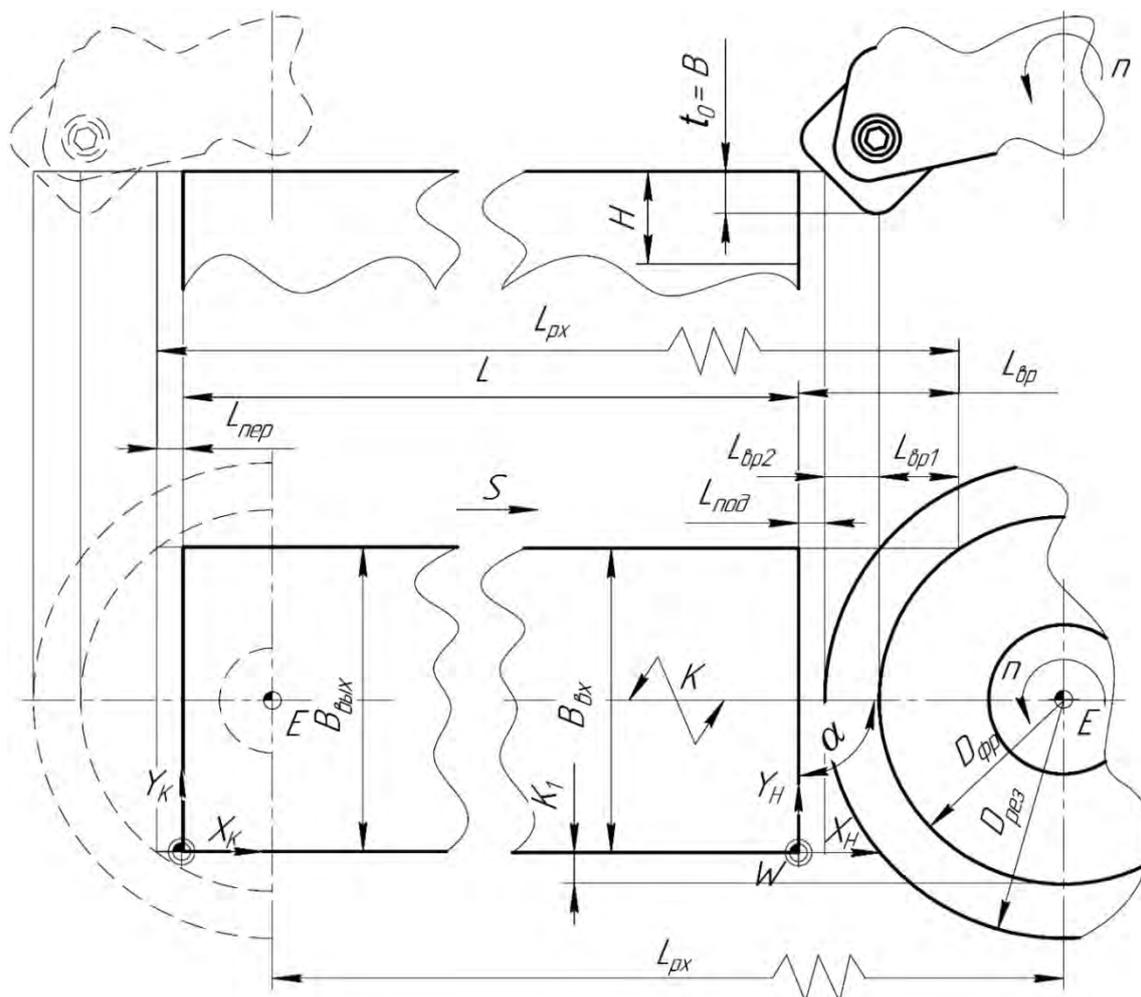


Рисунок 60 – Общая принципиальная расчетная схема для определения величин рабочего хода и врезания, а так же координат начального и конечного положения фрезы при врезании и выходе по прямой перпендикулярно направлению подачи

Для фрезерования торцевыми фрезами величина врезания складывается из трех компонентов (рис. 60):

$$L_{вр} = L_{вр1} + L_{вр2} + L_{под}$$

где  $L_{\text{вп1}}$  – обусловлена отношением диаметра резания  $D_{\text{рез}}$ , ширины заготовки на входе  $B_{\text{вх}}$  (или радиуса  $R_{\text{вх}}$ ), симметричностью их расположения  $K$  и углом  $\alpha$ ;  $L_{\text{вп2}}$  – обусловлена формой твердосплавной пластины;  $L_{\text{нод}}$  – величина минимального безопасного подвода инструмента (принимается 2...3 мм).

Аналогично расчетам для концевых фрез, в зависимости от сочетания значений диаметра фрезы  $D_{\text{фр}}$ , ширины  $B_{\text{вх}}$  (радиуса  $R_{\text{вх}}$ ) заготовки, симметричности их расположения  $K$  и угла врезания  $\alpha$  для торцевых фрез также определены положения начал системы координат  $(X_{\text{н}}, Y_{\text{н}})$  инструмента относительно системы координат заготовки, модели для расчета величин врезания  $L_{\text{вп1}}$  (табл. 19), а также координат конечных положений фрез.

Таблица 19 – Фрагмент таблицы моделей для определения начальных координат и величины врезания при врезании торцевой фрезой

Условие применения	Величина врезания $L_{\text{вп1}}$	Координаты $X_{\text{н}}$ и $Y_{\text{н}}$
$D_{\text{фр}} < B_{\text{вх}}; K = 0;$ $\alpha = 90^\circ$	$L_{\text{вп1}} = \frac{D_{\text{фр}}}{2};$	$X_{\text{н}} = L_{\text{нод}} + \frac{D_{\text{рез}}}{2}; Y_{\text{н}} = \frac{B_{\text{вх}}}{2}$
$D_{\text{фр}} > B_{\text{вх}}; K = 0;$ $\alpha = 90^\circ$	$L_{\text{вп1}} =$ $= \left( \frac{D_{\text{фр}}}{2} - \sqrt{\left( \frac{D_{\text{фр}}}{2} \right)^2 - \left( \frac{B_{\text{вх}}}{2} \right)^2} \right)$	$X_{\text{н}} = L_{\text{нод}} + \frac{D_{\text{рез}}}{2}; Y_{\text{н}} = \frac{B_{\text{вх}}}{2}$
$D_{\text{фр}} < \frac{B_{\text{вх}}}{2};$ $\frac{D_{\text{фр}}}{2} \leq K \leq \frac{B_{\text{вх}}}{2};$ $\alpha = 90^\circ$	$L_{\text{вп1}} = \frac{D_{\text{фр}}}{2}$	$X_{\text{н}} = L_{\text{нод}} + \frac{D_{\text{рез}}}{2};$ $Y_{\text{н}} = \frac{B_{\text{вх}}}{2} + K$
...	...	...
$D_{\text{фр}} < 2R_{\text{вх}}; K = 0$	$L_{\text{вп1}} = (D_{\text{фр}} / 2) +$ $+ \left( R_{\text{вх}} - \sqrt{(R_{\text{вх}})^2 - \left( \frac{D_{\text{фр}}}{2} \right)^2} \right)$	$X_{\text{н}} = L_{\text{нод}} + \frac{D_{\text{рез}}}{2}$ $Y_{\text{н}} = K$
$D_{\text{фр}} < R_{\text{вх}};$ $\frac{D_{\text{фр}}}{2} + K < R_{\text{вх}};$ $K \neq 0$	$L_{\text{вп1}} = \sqrt{\left( R_{\text{вх}} + \frac{D_{\text{фр}}}{2} \right)^2 - K^2} -$ $-\sqrt{(R_{\text{вх}})^2 - \left( \frac{D_{\text{фр}}}{2} + K \right)^2}$	$X_{\text{н}} = L_{\text{нод}} + \left( \sqrt{\left( R_{\text{вх}} + \frac{D_{\text{рез}}}{2} \right)^2 - K^2} - \right.$ $\left. - R_{\text{вх}} \right)$ $Y_{\text{н}} = K$
...	...	...

В таблице 19 для расчета  $X_{\text{н}}$  и  $Y_{\text{н}}$  торцевых фрез используется формула

$$D_{рез} = D_{фр} + L_{фр2}.$$

Анализ каталогов фирм производителей торцовых фрез и твердосплавных пластин позволил свести все многообразие пластин к четырем вариантам для определения составляющей величины врезания  $L_{фр2}$  (рис. 61 а). Для этих вариантов разработаны расчетные схемы и математические модели.

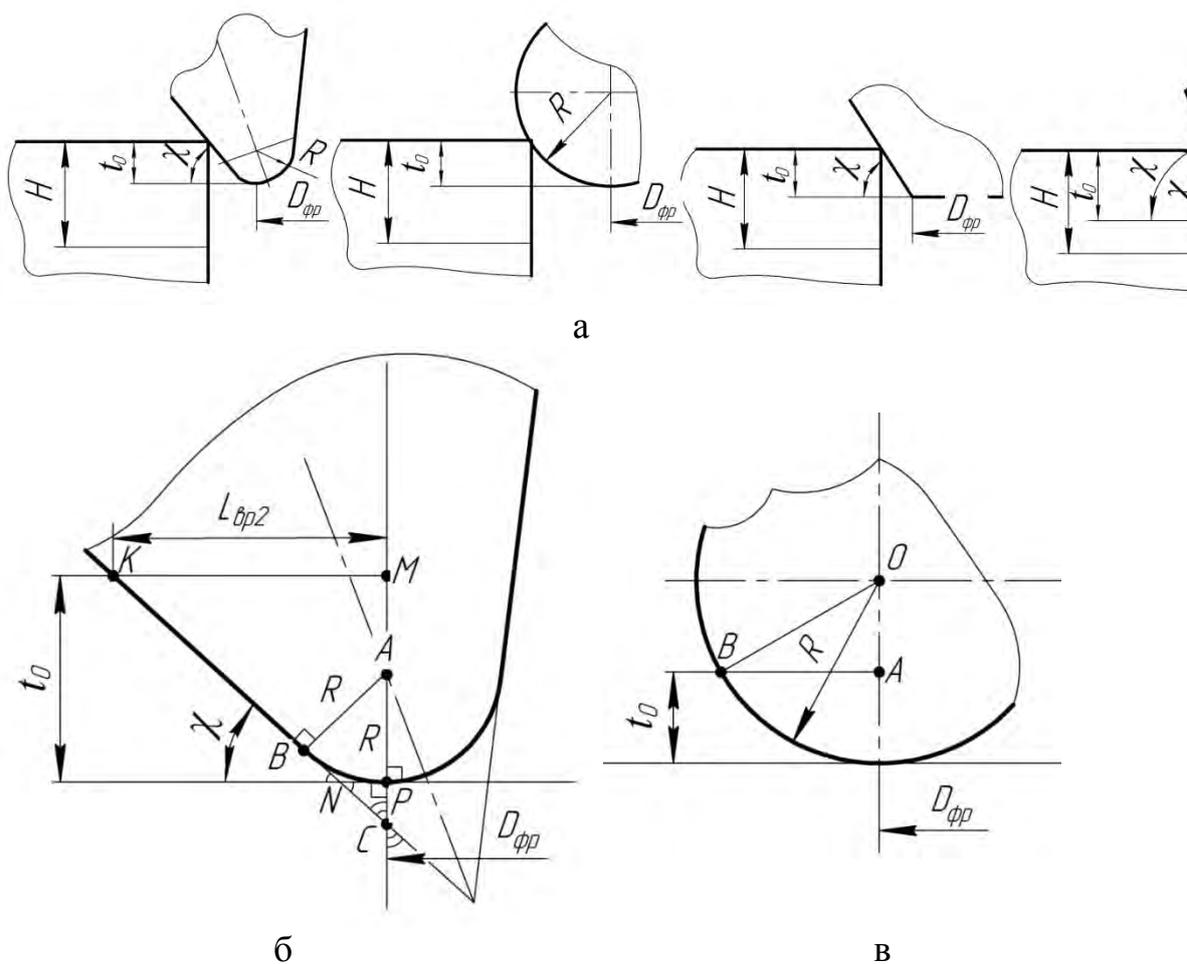


Рисунок 61 – Варианты пластин для определения  $L_{фр2}$  с примерами расчетных схем

Так для первого варианта пластины из  $\triangle CPN$  (рис. 61 б):

$$\angle C = 180^\circ - 90^\circ - \chi = 90 - \chi.$$

Из  $\triangle ACB$

$$AC = \frac{AB}{\sin C}; \quad AB = R; \quad AC = \frac{R}{\sin C}.$$

Из  $\triangle AMK$

$$MC = AC + AM; AM = t_o - R; MC = \frac{R}{\sin C} + (t_o - R); MK = MC \cdot \operatorname{tg} C;$$

$$L_{ep2} = MK = \left( \frac{R}{\sin C} + (t_o - R) \right) \cdot \operatorname{tg} C = \left( \frac{R}{\cos \chi} + t_o - R \right) \cdot \operatorname{ctg} \chi.$$

Для круглой пластины из  $\triangle OAB$  (рис. 61 в)

$$OA = R - t_o; OB = R;$$

$$L_{ep2} = AB = \sqrt{R^2 - (R - t_o)^2} = \sqrt{R^2 - (R^2 - 2Rt_o + t_o^2)} = \sqrt{t_o(2R - t_o)}.$$

В том случае, если при врезании вектор, условно направленный из центра фрезы параллельно подаче, не перпендикулярен прямой врезания на заготовке или не направлен в центр радиуса заготовки ( $K > B_{ex} / 2$  и  $K \neq 0$ ), то расчет составляющей величины врезания  $L_{ep2}$  следует вести согласно схемам представленным на рисунке 62.

Для врезания по прямой (рис. 62 а):

$$L_{ep21} = AB - CB.$$

Из  $\triangle AOB$  и  $\triangle COB$

$$AB = \sqrt{\left( \frac{D_{pez}}{2} \right)^2 - \left( K - \frac{B_{ex}}{2} \right)^2}; CB = \sqrt{\left( \frac{D_{fp}}{2} \right)^2 - \left( K - \frac{B_{ex}}{2} \right)^2};$$

$$L_{ep21} = \sqrt{\left( \frac{D_{pez}}{2} \right)^2 - \left( K - \frac{B_{ex}}{2} \right)^2} - \sqrt{\left( \frac{D_{fp}}{2} \right)^2 - \left( K - \frac{B_{ex}}{2} \right)^2}.$$

Для врезания по окружности (рис. 62 б)

$$L_{ep21} = O_2O_3 = MN = O_1N - O_1M.$$

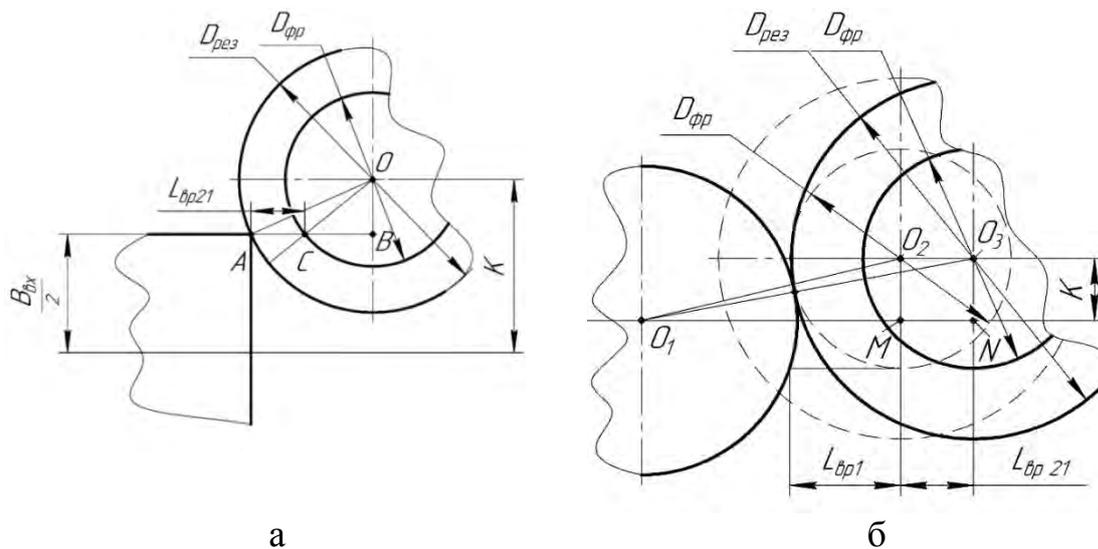


Рисунок 62 – Расчетные схемы для определения составляющей величины врезания  $L_{ep2}$  при  $K > B_{вх} / 2$  и  $K \neq 0$

Из  $\triangle OO_1M$  и  $\triangle OO_3N$

$$O_1N = \sqrt{\left(R_{вх} + \frac{D_{рез}}{2}\right)^2 - K^2}; O_1M = \sqrt{\left(R_{вх} + \frac{D_{фр}}{2}\right)^2 - K^2},$$

$$L_{ep21} = \sqrt{\left(R_{вх} + \frac{D_{рез}}{2}\right)^2 - K^2} - \sqrt{\left(R_{вх} + \frac{D_{фр}}{2}\right)^2 - K^2}.$$

#### 4.2.3 Система автоматизированного расчета параметров размерной настройки фрез для программирования обработки плоских поверхностей на станках с ЧПУ

Предложенные методики, модели и алгоритмы позволили создать программное обеспечение системы поддержки принятия решений и доказать работоспособность [192–198]. Основной интерфейс приложения разработан с помощью языка гипертекстовой разметки HTML, для перехода между страницами используются ссылки, а для размещения картинок, текста и полей для ввода – блоки (рис. 63–64). Для визуального восприятия использовались таблицы стилей CSS. Математическая часть и логические взаимосвязи приложения реализованы с помощью JavaScript.

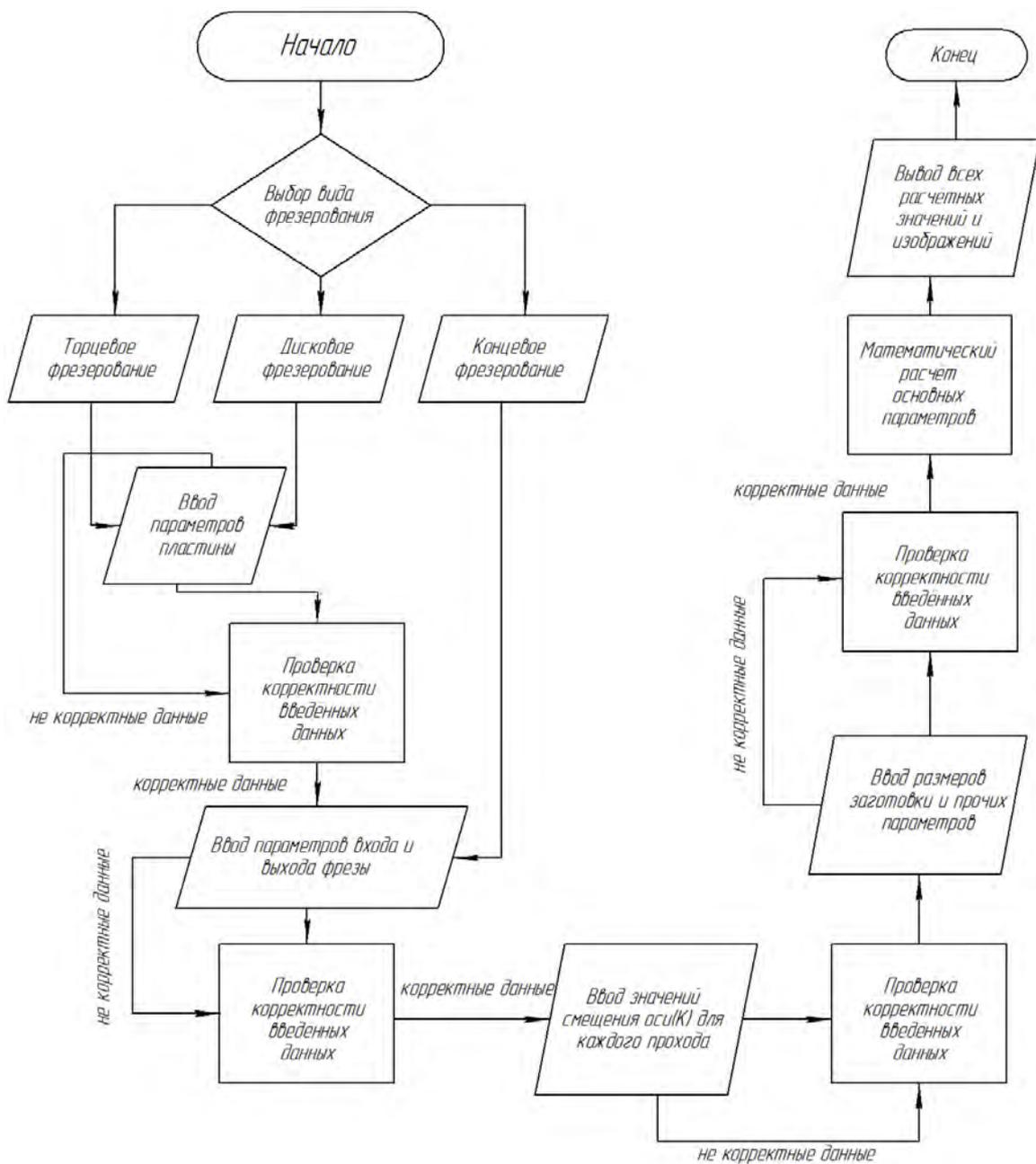


Рисунок 63 – Принципиальная блок-схема алгоритма использования программного обеспечения

При работе с системой пользователь последовательно вводит информацию о геометрических параметрах заготовки на входе и выходе инструмента, смещении фрезы относительно плоскости симметрии, припусках и режимах резания, геометрических параметрах твердосплавных пластин и фрезы в целом, а результатом работы являются координаты начального и конечного положения фрезы, величины врезания, рабочих ходов и основное (машинное) время обработки на участках врезания и устойчивого резания фрезы (рис. 64).

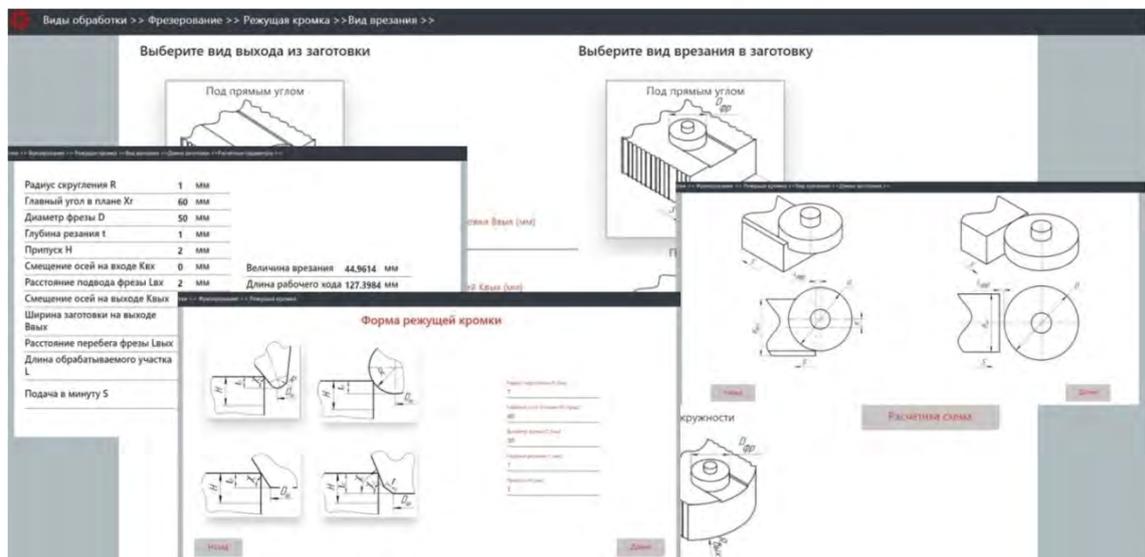
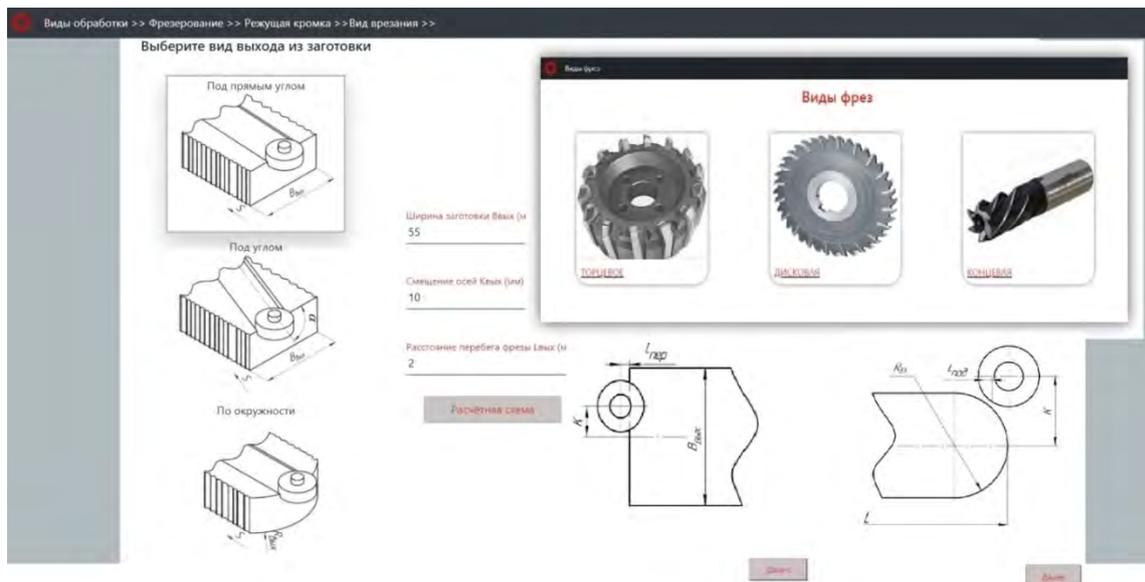


Рисунок 64 – Интерфейсы программного обеспечения

### 4.3 Погрешность базирования и установки

Погрешность установки заготовки в приспособлении обусловлена:

- погрешностями формы и относительного положения технологических баз;
- погрешностями, заложенными при проектировании технологического процесса (погрешность схемы базирования и погрешность схемы установки);
- погрешностями закрепления.

Погрешности технологических баз приводят к смещению  $\Delta_b$  измерительных баз (рис. 65) и проявляются как стационарные случайные

погрешности обеспечиваемых на данной операции размеров  $A$  и  $B$ , поскольку в данной задаче размер настройки  $A_n$  считается неизменным.

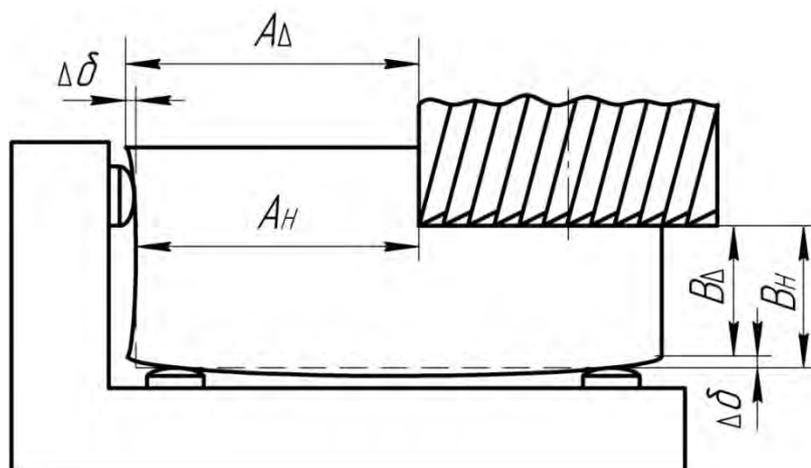


Рисунок 65 – Схема формирования погрешности базирования

Схема базирования должна быть спроектирована таким образом, чтобы базовая система координат лежала на компонентах ГМЗ, от которых заданы размеры и показатели угловой ориентации обрабатываемых элементов заготовки. Если это требование *невозможно выполнить*, то появляются условия для возникновения *погрешности схемы базирования*. Условия для возникновения погрешности схемы базирования имеют место, когда из-за некорректной простановки размеров или по другим причинам невозможно создать БСК на компонентах ГМЗ, от которых заданы размеры и показатели угловой ориентации обрабатываемых элементов заготовки.

Пример указанной ситуации приведен на рисунке 66. Положение оси обрабатываемого отверстия определяется углом  $\beta$ , который откладывается от плоскости Б, перпендикулярной установочной базе (плоскость С), и расстоянием  $A_n$ , которое откладывается от наружного диаметра ГМО. Плоскость Б будет направляющей базой. Провести третью плоскость СКО через точку М нельзя, так как в этом случае не получится декартовой системы координат. Кроме того, ее положение не является постоянным, а зависит от диаметра  $D$ , который изменяется в пределах допуска. Поэтому эту плоскость ССК (Е) следует провести через точку О. В таком случае размер  $A_n$  зависит от фактического значения радиуса детали и колеблется в пределах допуска. Тогда погрешность схемы базирования

$$\Delta_{co}(A_n) = TD/2.$$

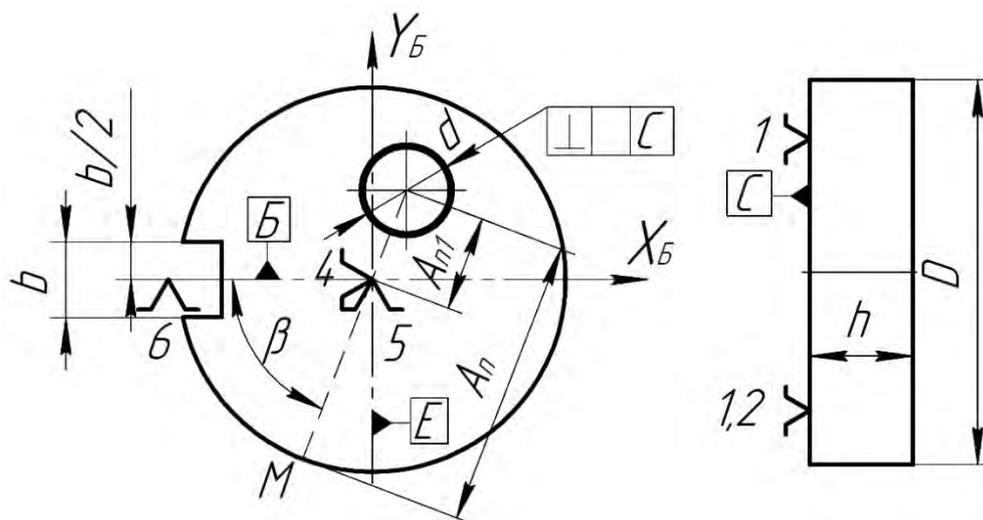


Рисунок 66 – Иллюстрация условий для проявления погрешности схемы базирования по размеру

Если задать размер  $A_{n1}$  вместо  $A_n$ , то условий для появления погрешности схемы базирования не будет.

На этапе проектирования теоретической схемы установки нужно обеспечить контакт технологических баз с моделями установочных компонентов (сформировать опорные точки), тем самым определить положение установочной системы координат (УСК) (рис. 67). Однако это возможно далеко не всегда, особенно если технологические базы являются скрытыми. Тогда возникают условия для появления *погрешности теоретической схемы установки*. Погрешностью теоретической схемы установки будем называть поле рассеяния отклонений положения установочной системы координат от базовой системы координат при разработке схемы установки.

Таким образом, при проектировании схемы установки желательно совместить опорную систему координат с базовой (собственной), чтобы не создавать условия для возникновения *погрешности схемы установки* – меры несовпадения опорной и базовой систем координат.

*Погрешностью схемы установки* будем называть поле рассеяния отклонений положения базовой системы координат от заданного при разработке схемы установки. При этом считается, что технологические базы не имеют погрешностей формы. Причиной возникновения погрешности схемы установки являются погрешности размеров объекта производства, которые получены на этапах обработки, предшествующих рассматриваемому. Погрешность схемы установки относят обычно к размерам, выполняемым на рассматриваемой операции.

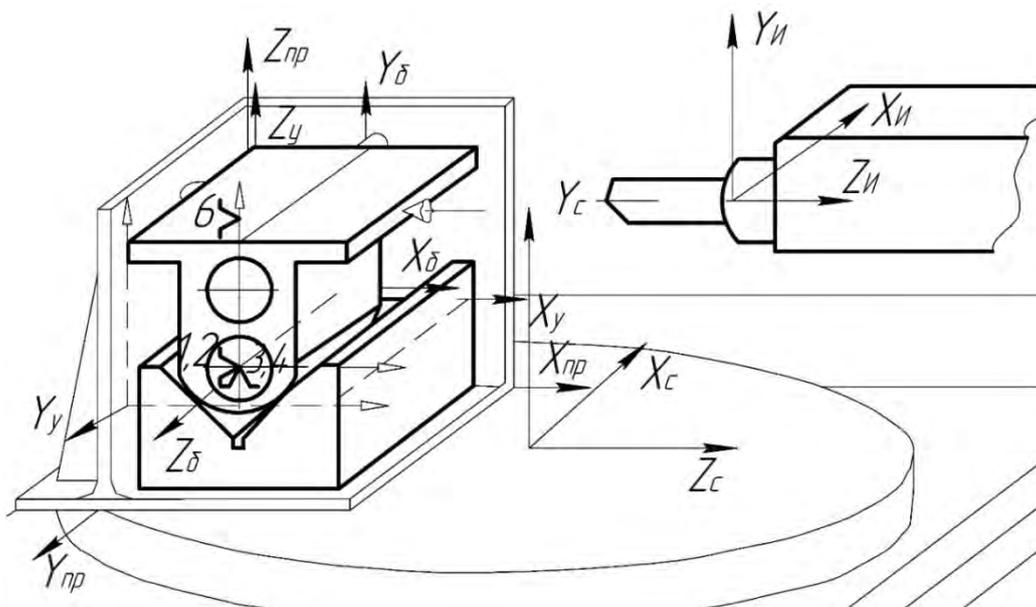


Рисунок 67 – Взаимное расположение систем координат:

*B* – базовая система координат (система координат объекта производства); *y* – установочная (опорная) система координат; *pr* – система координат приспособления; *c* – станок; *u* – инструмент

Например, на операции фрезерования выполняются размеры  $A_2$  и  $B_2$  (рис. 68), для чего режущие кромки фрезы устанавливаются относительно компонентов ОСК на расстояния, соответствующие размерам настройки  $A_n$  и  $B_n$ . Другие погрешности обработки, возникающие по разным причинам, в данной задаче не учитываются. При выполнении размера  $A_2$  ось  $Y_y$  УСК не совпадает с осью  $Y_B$  СКО. Следовательно, условия для возникновения погрешности схемы установки по этому размеру имеются. До рассматриваемой операции в направлении оси  $X$  выполнен размер  $A_1$  с допуском  $TA_1$ . Поскольку размер настройки  $A_n$  остается постоянным для всей обрабатываемой партии деталей и другие погрешности в данной задаче не учитываются, то  $A_2$  может изменяться только в зависимости от размера  $A_1$  в пределах допуска  $TA_1$ .

Погрешность схемы установки проявляется как случайная величина, так как причина, ее порождающая (погрешность размера  $A_1$ ), тоже является случайной величиной. Принято считать, что погрешность схемы установки – симметричная случайная величина, которая подчиняется нормальному закону распределения с математическим ожиданием, равным нулю. Тогда ее характеристикой будет максимально возможное поле рассеяния, в рассматриваемом случае  $TA_1$ . Следовательно, можно записать

$$\Delta_{cy}(A_2) = TA_1,$$

где  $\Delta_{cy}(A_2)$  – погрешность схемы установки по размеру  $A_2$ .

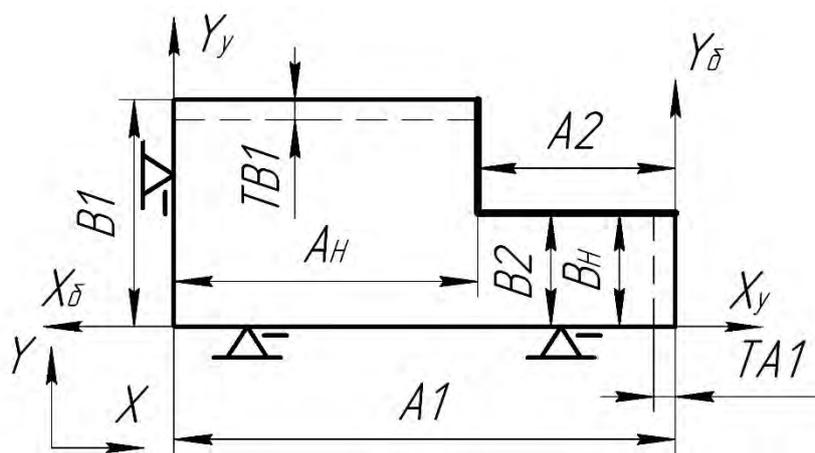


Рисунок 68 – Операционный эскиз

При выполнении размера  $B_2$  оси  $X_\delta$  (СКО) и  $X_y$  (УСК) совпадают. Следовательно, условий для возникновения погрешности схемы установки нет. Действительно, случайные погрешности размера  $B_1$  не влияют на положение  $X_\delta$ , т. е. на размер  $B_2$ .

Очень часто погрешность схемы установки зависит не от одного, а от нескольких размеров. В таких случаях алгоритм решения задачи определения погрешности схемы установки многозвенной размерной цепи состоит из следующих этапов: 1) на операционном эскизе указываются все выполненные ранее и выполняемые на рассматриваемой операции размеры, СКО и УСК, а также размеры настройки (рис. 69); 2) строится размерная цепь (рис. 69); 3) определяется погрешность замыкающего звена, которым является выполняемый размер. При этом погрешность настроечного размера  $A_n$  считается равной нулю, так как она, оставаясь постоянной для всей партии обрабатываемых деталей, не может быть источником случайной погрешности.

Максимально возможное (но весьма маловероятное) значение погрешности схемы установки определяется по формуле

$$\Delta_{cy}(A_n) = \sum_{i=1}^{n-1} TA_i,$$

где  $n$  – число звеньев размерной цепи.

Из математической статистики известно, что при заданной доверительной вероятности  $P$  поле рассеяния случайной величины (в нашем случае погрешность звена размерной цепи  $A_i$ ) связано со стандартным отклонением, а следовательно, и с дисперсией  $D_i$  следующим равенством:  $TA_i = \lambda_i \sqrt{D_i}$ , где  $\lambda_i$  – коэффициент, зависящий от закона распределения рассматриваемого звена и доверительной вероятности  $P$ . С другой стороны, известно, что если случайная величина является алгебраической суммой других случайных величин, то дисперсия суммы равна

сумме дисперсий слагаемых. На этом основании можно записать для линейной размерной цепи:

$$\Delta_{cy}(A_n) = \lambda_n \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^{n-1} (TA_i / \lambda_i)^2},$$

где  $\lambda_i$  для нормального закона распределения равен 3, а для закона равной вероятности – 1,732.

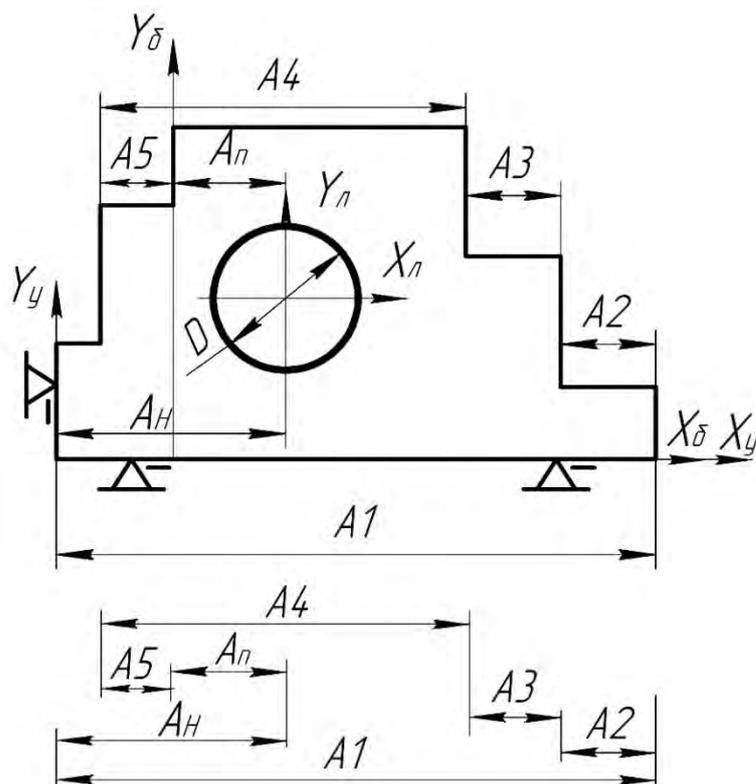


Рисунок 69 – Расчетная схема и размерная цепь

Последним выражением предлагается пользоваться при  $n > 3$  (если погрешности составляющих звеньев распределены по нормальному закону) и при  $n > 6$  (если погрешности составляющих звеньев распределены по закону равной вероятности).

Для случая, показанного на рисунке 69, можем записать

$$\Delta_{cy}(A_n) = \sqrt{TA_1^2 + TA_2^2 + TA_3^2 + TA_4^2 + TA_5^2}.$$

Погрешность схемы установки для *плоской размерной цепи* определяется так же, как и для многозвенной линейной цепи. Отличие состоит только в том, что все звенья плоской размерной цепи необходимо спроектировать на направление вектора замыкающего звена. Например,

размерная цепь для схемы, показанной на рисунке 70 а, изображена на рисунке 70 б. Размерная настройка в данном случае осуществляется от начала УСК. Проектируя звенья размерной цепи на  $A_n$ , получаем

$$A_H - B_1 \sin \alpha - A_1 \cos \alpha - A_n = 0.$$

Тогда

$$\Delta_{cy}(A_n) = TB_1 \sin \alpha + TA_1 \cos \alpha.$$

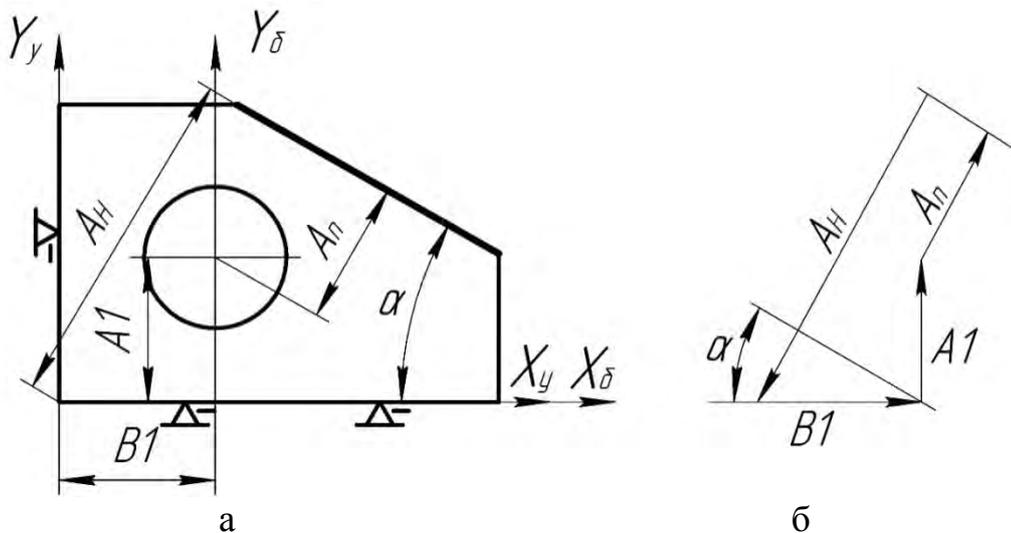


Рисунок 70 – Расчетная схема (а) и плоская размерная цепь (б)

Рассмотрим установку по наружной цилиндрической поверхности при помощи призмы для обработки отверстия диаметром  $d$ . Кроме того, должны быть выдержаны размер  $A_{n1}$  и угол  $\beta$ . До рассматриваемой операции были обработаны наружный диаметр  $D$  с допуском  $TD$ , шпоночный паз шириной  $b$  с допуском  $Tb$ . Соответствующая схема установки показана на рисунке 71, а расчетная схема и размерные цепи для расчета погрешности схемы установки – на рисунке 72.

Уравнение плоской размерной цепи, показанной на рисунке 72 б, имеет вид

$$A_{n1} \sin \beta + A_{n2} \cos \beta = A_{n1} + OM \sin \beta,$$

где  $OM = D / (2 \cdot \sin \alpha)$ .

Тогда

$$A_{n1} = A_{n1} \sin \beta + A_{n2} \cos \beta - D \sin \beta / 2 \sin \alpha.$$

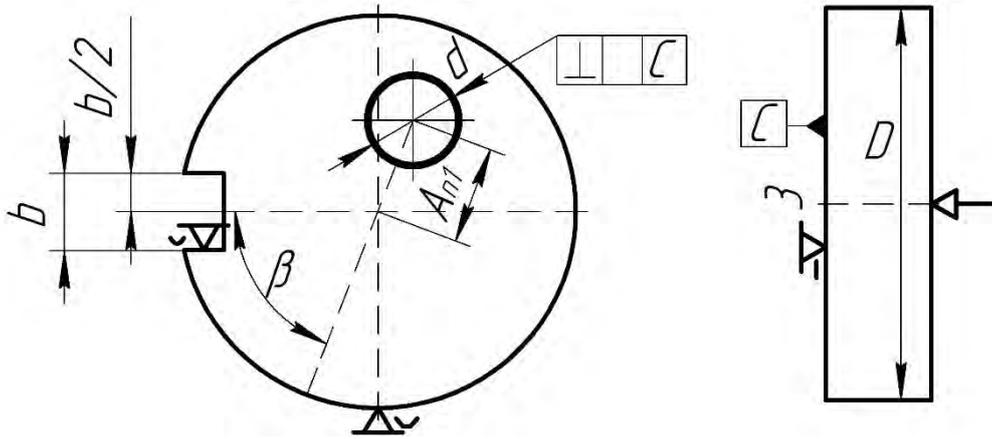


Рисунок 71 – Схема установки, соответствующая схеме базирования детали, представленной на рисунке 66

Дифференцированием по  $D$  получаем

$$d(A_{n1}) = dD \cdot \sin \beta / (2 \sin \alpha).$$

Размеры  $A_{n1}$ ,  $A_{n2}$  и  $\beta$  от размера  $D$  не зависят. Поэтому, заменив дифференциал малыми погрешностями, погрешность схемы установки по размеру  $A_{n1}$  можно определить с помощью модели

$$\Delta_{cy}(A_{n1}) = TD \cdot \sin \beta / (2 \sin \alpha).$$

Из второй размерной цепи (рис. 72 в) получаем

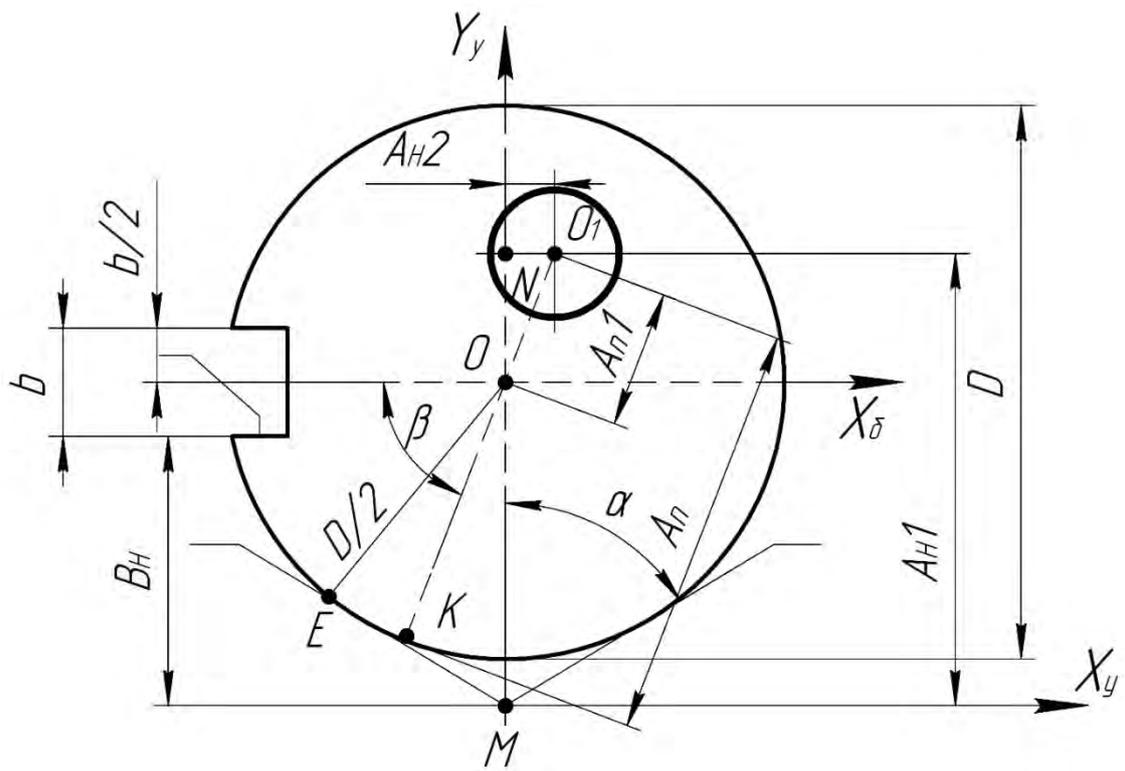
$$A_{n1} \sin \beta + A_{n2} \cos \beta = A_n - D/2 + OM \sin \beta,$$

Погрешность схемы установки по размеру  $A_n$  можно определить с помощью модели

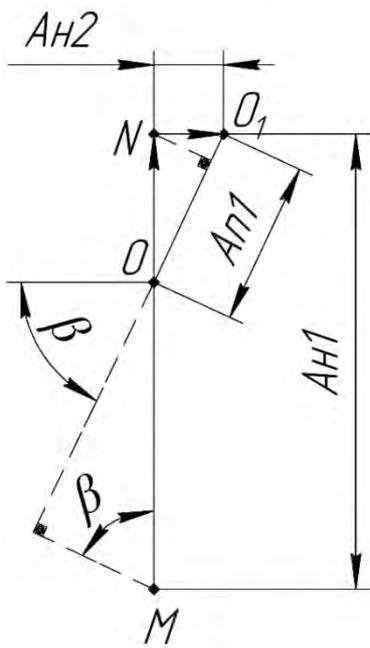
$$\Delta_{cy}(A_n) = TD/2 - TD \cdot \sin \beta / (2 \sin \alpha).$$

В этом случае погрешность схемы установки включает в себя соответствующую погрешность схемы базирования.

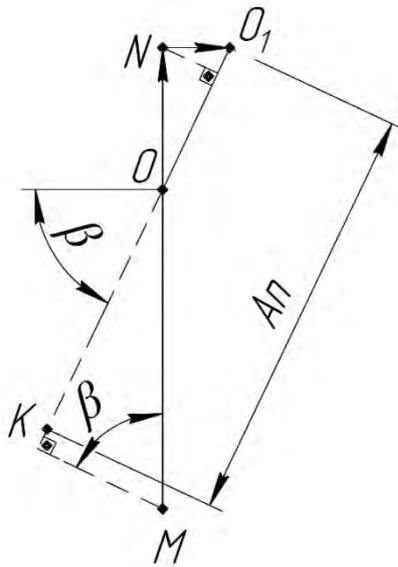
Причем если  $\beta = \alpha$ , то  $\Delta_{cy}(A_n) = 0$



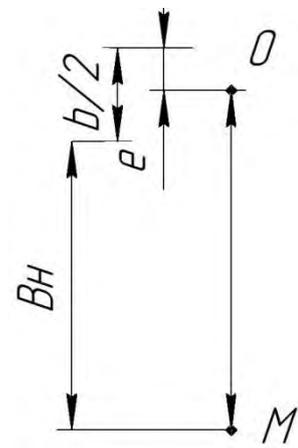
а



б



в



г

Рисунок 72 – Расчетная схема и размерные цепи для определения погрешности схемы установки, представленной на рисунке 66

Уравнение размерной цепи, показанной на рисунке 72 г, имеет следующий вид:

$$B_H + b/2 = e + OM = e + D/2 \sin \alpha,$$

где  $e$  – смещение оси цилиндра, вызванное погрешностью размеров  $D$  и  $b$ .

Тогда дополнительный поворот заготовки (погрешность схемы установки по углу  $\beta$ ) будет

$$\Delta_{cy}(\beta) = e/(D/2) = (TD/\sin \alpha + Tb)/D.$$

При установке по отверстию на цилиндрический палец возникает неопределенность положения заготовки, которая может смещаться в любом направлении в пределах зазора (рис. 73).

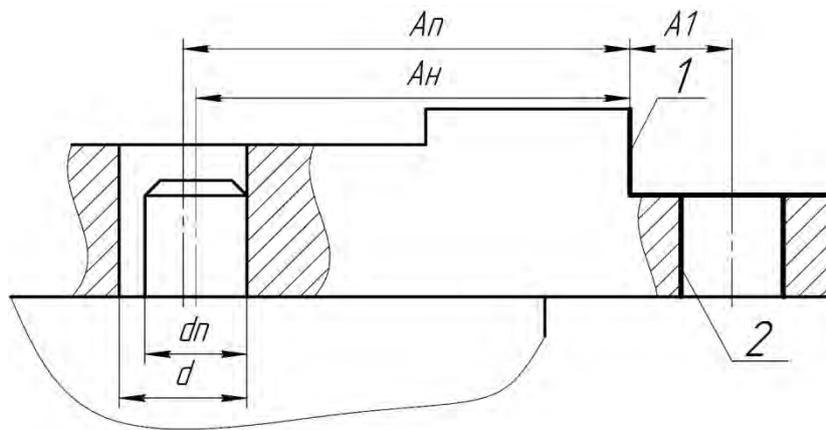


Рисунок 73 – Установка заготовки по отверстию на цилиндрический палец

Погрешность схемы установки  $\Delta_{cy}(A_H)$  в этом случае можно определить по модели

$$\Delta_{cy}(A_H) = Td + BO(d_n),$$

где  $Td$  – допуск диаметра отверстия;  $BO(d_n)$  – верхнее отклонение диаметра цилиндрического пальца.

При обработке нескольких поверхностей с одной установкой только по отношению к одной определяется погрешность схемы установки, и эта поверхность далее служит настроечной базой. Погрешность схемы установки  $\Delta_{cy}(A_1) = 0$ , т. к. поверхность 1 служит настроечной базой для обработки поверхности 2.

При установке заготовки на два пальца расчетная схема для определения погрешности схемы установки по углу  $\alpha$  будет иметь вид, представленный на рисунке 74.

На этой схеме  $O1, O2$  – оси отверстий,  $\Pi1$  – ось симметрии ромбического пальца,  $\Pi2$  – ось цилиндрического пальца. Тогда

$$\Delta_{cy}(\alpha) = \frac{e1_{\max} + e2_{\max}}{B} = \frac{(TD1 + BO(b1)) + (TD2 + BO(d2))}{B},$$

где  $TD1, TD2$  – допуски диаметров соответствующих отверстий;  $BO(b1), BO(d2)$  – верхние отклонения соответствующих пальцев. Погрешностью размера  $B$  можно пренебречь.

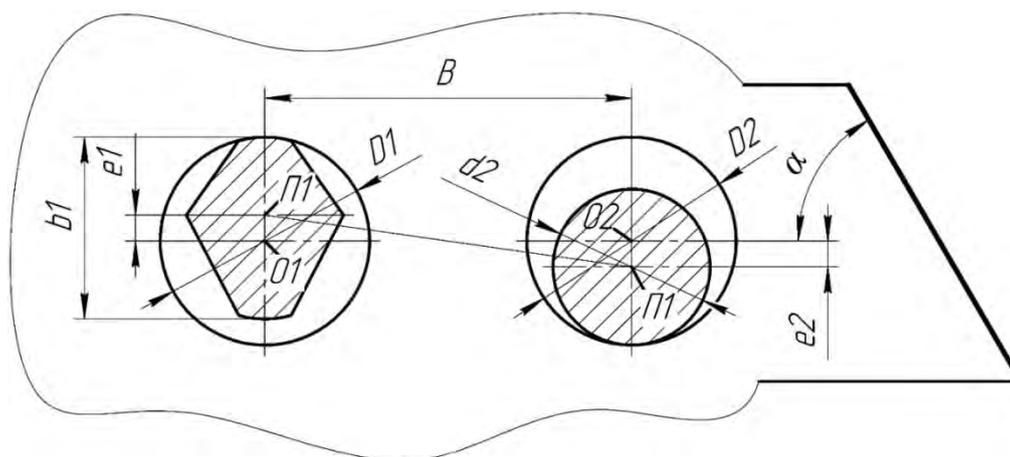


Рисунок 74 – Расчетная схема для определения погрешности схемы установки по углу  $\alpha$  при установке на цилиндрический и ромбический пальцы

Для анализа пригодности принятой схемы установки нужно оценить значение ее погрешности. В примере (рис. 75), возникают условия для возникновения погрешности схемы установки по размерам  $30 \pm 0,2$  и  $45^\circ$ .

Расчетная схема для определения погрешности схемы установки по размеру  $30 - \Delta_{cy}(30)$  показана на рисунке 76. Согласно размерной цепи, показанной на нем,  $A_{\Delta} = A_n \pm e$ , где  $A_{\Delta}$  – фактический размер,  $A_n$  – размер настройки, а  $e$  – максимальное отклонение положения технологической базы, равное полусумме допуска на размер отверстия ( $TD$ ) и верхнего отклонения пальца ( $BOd$ ). Тогда  $\Delta_{cy}(30) = 2(0,05 + 0,01) = 0,12$  мм. Так как допуск для расстояния от оси отверстия до обрабатываемой плоскости ( $0,4$  мм) на много больше погрешности схемы установки по этому размеру, то по нему принятая схема установки может считаться пригодной.

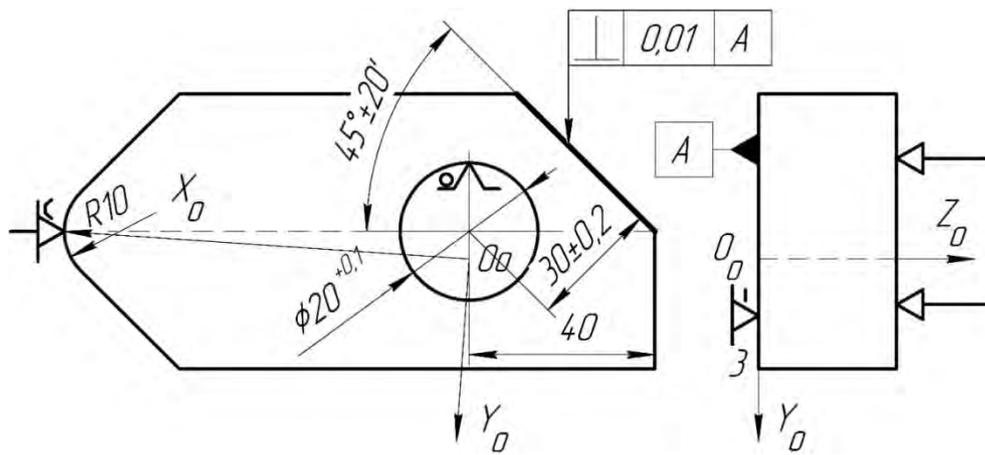


Рисунок 75 – Схемы базирования и установки

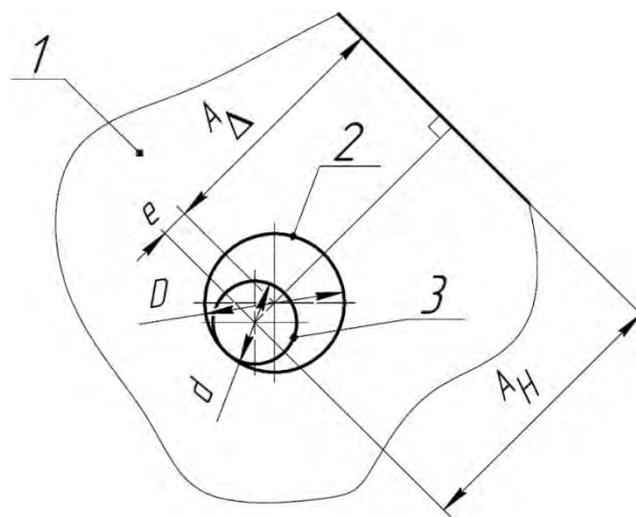


Рисунок 76 – Расчетная схема по размеру 30:  
1 – заготовка; 2 – отверстие; 3 – палец

Расчетная схема для определения погрешности схемы установки по размеру  $45^\circ$  показана на рисунке 77. Согласно угловой цепи, показанной на нем,  $\alpha_\Delta = \alpha_n \pm \gamma$ , где  $\alpha_\Delta$  – фактический угол,  $\alpha_n$  – угол настройки,  $\gamma$  – максимальное отклонение угла. Вследствие малости угла  $\gamma$ , его значение в минутах можно определить из следующего выражения  $\gamma = 180 \cdot 60 \cdot e / (\pi \cdot B)$ .

Подставляя значение  $e = 0,06$  и значение  $B = 60$ , получим  $\gamma = 3,44'$ . Тогда погрешность схемы установки по углу  $\Delta_{cy}(45^\circ) = 2 \cdot 3,44 = 6,88'$ . Это значение на много меньше допуска на угол, который составляет  $40'$ . Значит, и по углу расположения обрабатываемой плоскости принятая схема установки может считаться пригодной.

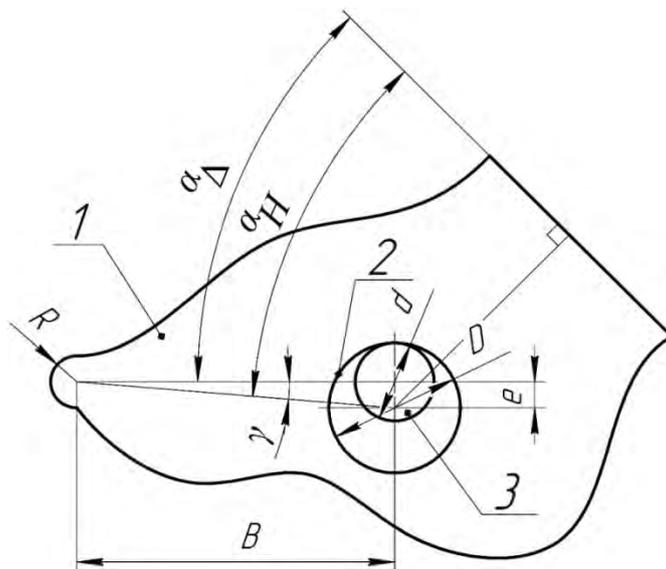


Рисунок 77 – Расчетная схема по размеру  $45^\circ$ :  
1 – заготовка, 2 – отверстие, 3 – палец

Требование точности перпендикулярности обрабатываемой плоскости к конструкторской базе выбранная схема установки также обеспечивает, так как в этом случае нет условий для появления погрешности схемы установки.

Погрешность схемы установки по цилиндрической поверхности равна нулю, если в качестве установочных элементов используются: 1) подпружиненный конический палец 1 (рис. 78); 2) самоцентрирующие установочно-зажимные элементы (цанги, разжимные оправки, гидрорасширители и т. д.).

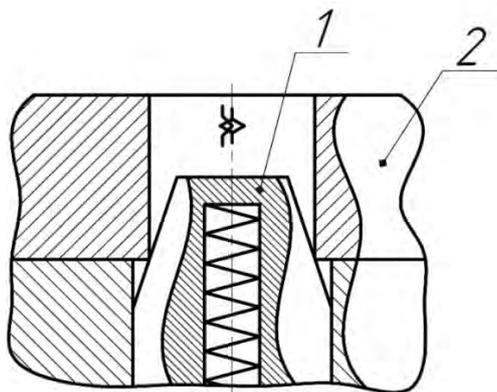


Рисунок 78 – Установка заготовки с помощью конического пальца

Под действием зажимающих сил изменяются полученное при базировании положение заготовки и ее форма. Причинами изменения исходного положения заготовки являются контактные упругие деформации в местах сопряжения заготовки с установочными элементами приспособления, а также упругие деформации самого приспособления. Для

партии заготовок *погрешность закрепления* считается равной нулю, если смещение конструкторской базы хотя и существенно, но постоянно. В этом случае смещение конструкторской базы частично компенсируется размерной настройкой. Остаются не скомпенсированными относительные повороты, возникающие из-за неравномерной нагрузки на установочные элементы.

Большая часть упругих деформаций станочных приспособлений приходится на стыки, особенно в подвижных соединениях, жесткость которых намного меньше, чем жесткость затянутых стыков. Последнее обстоятельство при установке заготовок в кулачковых патронах или в тисках приводит к существенному смещению зажимаемой заготовки в направлении, перпендикулярном к зажимаемой силе. Как это видно из схемы, изображенной на рисунке 79, указанное смещение возникает из-за поворота подвижной губки тисков парой сил (зажимающей  $P_{зж}$  и реакции  $R$ ) на плечо  $h$ . Зазоры и малая контактная жесткость направляющих делает этот поворот существенным.

Кольца и втулки при обработке закрепляются в самоцентрирующих патронах или на разжимных оправках. Под действием радиальных зажимающих сил эти заготовки деформируются (рис. 80). После обработки в закрепленном состоянии получается поверхность правильной формы. Но после открепления заготовки и ее упругого восстановления форма поверхности искажается. Такая погрешность формы сопоставима с допуском (и даже превышает его) при обработке тонкостенных и высокоточных деталей. Уменьшить ее можно, увеличив количество установочно-зажимных элементов. Если за единицу принять погрешность формы, получаемую при закреплении в трехкулачковом патроне, то погрешность закрепления в четырехкулачковом патроне составит 0,38, а в шестикулачковом – 0,11.

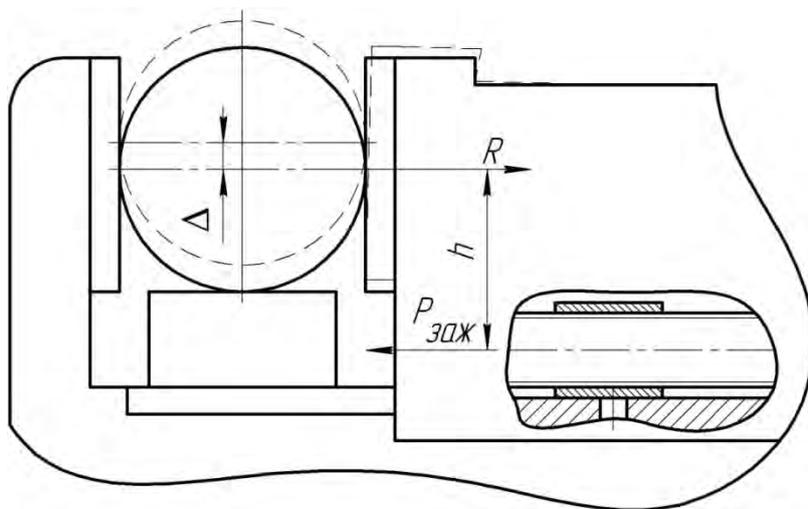


Рисунок 79 – Схема смещения заготовки в направлении, перпендикулярном к зажимающей силе

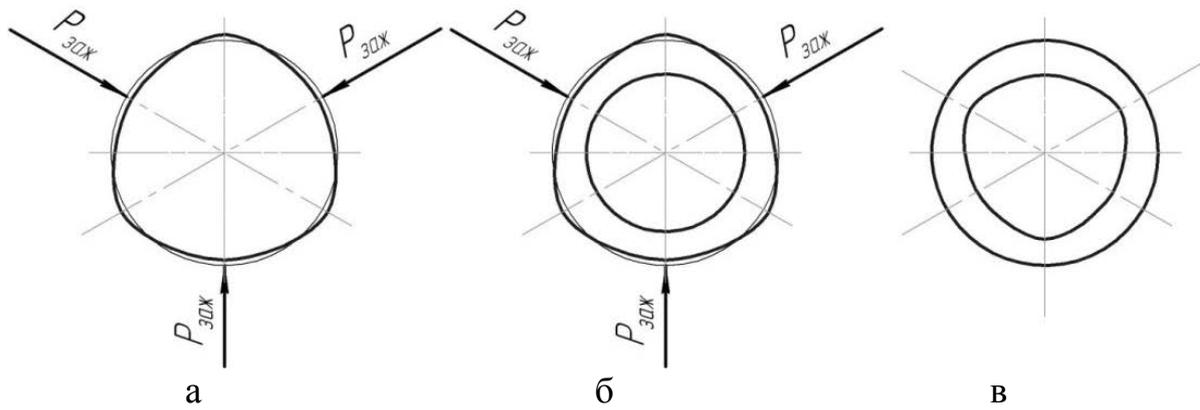


Рисунок 80 – Схема формирования погрешности формы при действии зажимающих сил:

а – форма заготовки после закрепления; б – форма расточенного отверстия в закрепленной заготовке; в – форма отверстия после раскрепления заготовки

Существенно уменьшает упругую деформацию увеличение ширины кулачков (угла охвата). При этом радиус цилиндрической поверхности установочно-зажимного элемента для базирования по наружной поверхности кольца должен быть равен радиусу технологической базы. При увеличении угла охвата зоны контакта кулачка с заготовкой от нормального для трехкулачкового патрона до  $60^\circ$  относительная погрешность формы уменьшается в 8...12 раз. Погрешность формы существенно уменьшается, если силы зажима прикладываются к торцу тонкостенной или высокоточной втулки.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе предложена система терминов и определений базирования, отличающаяся разграничением понятий реального и проектного базирования при механической обработке, аддитивном синтезе, сборке и измерениях, составов и комплектов баз, схем базирования и установки, введением положения корректности задания допусков расположения конструктивных элементов, а также алгоритмизацией процессов базирования, создающая условия для автоматизации проектного базирования в аддитивном и субтрактивном машиностроительном производствах.

Предложено методическое и алгоритмическое обеспечение формирования конструкторско-технологических моделей деталей сложной формы в задаче проектного базирования в виде массивов параметризованных комплексных функциональных модулей и структуры линейных и угловых связей между ними на различных этапах их изготовления в аддитивном и субтрактивном многономенклатурных машиностроительных производствах.

На основе сформулированной системы терминов и определений проектного базирования, а также методики формирования конструкторско-технологической модели заготовки детали предложен новый подход к синтезу структуры универсально-сборных приспособлений для заготовок деталей сложной формы, заключающийся в последовательном определении возможных составов баз ориентации для всех конструктивных элементов; группировании идентичных составов; проверке возможности обработки элементов конструкции за один установ на имеющемся оборудовании; идентификации составов баз ориентации; определении числа налагаемых связей и синтезе состава установочных элементов приспособления, который при реализации сокращает трудоемкость проектных работ.

Представление разработанных методик на языке теории графов, алгебры логики, теории множеств, теории алгоритмов и теории размерных цепей позволило создать систему поддержки принятия решений синтеза УСП для механической обработки нетиповых (оригинальных) заготовок деталей и доказать их работоспособность. Разработанная система позволяет снижать вероятность неустранимого брака за счет научно-обоснованного решения вопроса обеспечения допусков расположения конструктивных элементов детали на этапе проектирования компоновки; снижать временные затраты на подготовку производства; собирать приспособления сборщиком невысокой квалификации; составлять наиболее рациональную номенклатуру пусковых комплектов; включить службу УСП в единую автоматизированную систему технологической подготовки производства.

Система терминов и определений проектного базирования позволила предложить последовательность процедур определения ориентации моделей деталей в рабочей зоне 3D-принтеров, включающую, определение и идентификацию возможных составов баз ориентации конструктивных элементов, определение параметров геометрической точности 3D-принтера, формирование базовой системы координат (за счет наложения на модель геометрических связей) и ее привязку к системе координат 3D-принтера и уже на стадии проектирования дает возможность оценить достижимость заданных чертежом допусков расположения конструктивных элементов, а также рекомендовать варианты ориентации модели детали в рабочей зоне 3D-принтера для обеспечения допусков расположения.

Использование указанной последовательности, а также методического и алгоритмического обеспечения формирования модели детали позволило разработать автоматизированную систему поддержки принятия решений по базированию в аддитивном синтезе, позволяющую прогнозировать обеспечение точности допусков расположения поверхностей при 3D-печати; рекомендовать варианты базирования моделей деталей в рабочей зоне 3D-принтера на основе анализа его геометрической точности для обеспечения допусков расположения и, как следствие, снижать вероятность печати бракованных деталей. Разработки могут использоваться в проектных бюро предприятий, использующих 3D-принтеры, IT-компаниях для создания и совершенствования программ-слайсеров, образовательном процессе для подготовки специалистов в области производства изделий на основе трехмерных технологий.

На основе предложенных понятий настроечной базы и погрешности схемы установки, а также анализа условий врезания фрез и их геометрических параметров предложен новый подход к моделированию рациональных положений систем координат заготовки и инструмента в начальной и конечной точках траекторий резания, а также величин врезания инструментов при фрезеровании современными твердосплавными пластинами, обеспечивающий минимальные значения длин врезания и рабочих ходов и, как следствие, снижение затрат на обработку.

Использование разработанных моделей дало возможность создания системы поддержки принятия решений для определения ряда параметров размерной настройки фрез при программировании обработки на станках с ЧПУ, позволяющей снижать затраты на обработку плоских поверхностей торцовыми фрезами из-за сокращения основного (машинного) времени их обработки за счет минимизации величин рабочих ходов фрез; повышать срок службы и период стойкости фрезы за счет назначения рекомендованных производителями инструмента щадящих режимов резания на участке динамических нагрузок при врезании фрезы; улучшать показатели качества поверхности на участке врезания инструмента. Разработки могут использоваться в проектных бюро маши-

ностроительных предприятий при размерной настройке универсальных фрезерных станков и проектировании их наладок, разработке управляющих программ для станков с ЧПУ фрезерной группы; в организациях специализирующихся на разработке систем автоматизированного проектирования для разработки и совершенствовании САМ-систем; в образовательном процессе для подготовки специалистов в области технологии машиностроения.

Все описанные системы прошли опытную эксплуатацию в образовательном процессе кафедр технологии и оборудования машиностроительного производства учреждения образования «Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой» и технологии машиностроения учреждения образования «Витебский государственный технологический университет».

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Единая система технологической документации (ЕСТД): Термины и определения основных понятий : ГОСТ 3.1109-82. – Введ. 01.01.83. – Москва : Стандартинформ, 2012. – 14 с.
2. Базров, Б. М. Совершенствование производства деталей на основе модульной технологии / Б. М. Базров // Москва : ЦНИИТЭИ приборостроения. Выпуск 4, 1989. – С – 52.
3. Попок, Н. Н. Мобильная реорганизация машиностроительного производства / Н. Н. Попок // Минск : Технопринт, 2001. – 396 с.
4. Петров, П. С. Визуальная база данных параметрических элементов универсально-сборных приспособлений / П. С. Петров, А. Н. Феофанов // Вестник МГТУ СТАНКИН. – 2017. – № 2. – С. 30–31.
5. Серков, Е. А. Автоматизация процесса проектирования групповых станочных приспособлений / Е. А. Серков // Приборостроение.– 2010. – № 8. – С. 56
6. Белов, Е. В. Разработка САПР УСП / Е. В. Белов, Е. С. Окунев // Тезисы докладов 52-й Международной научно-технической конференции преподавателей и студентов / УО «ВГТУ». – Витебск, 2019. – С. 254.
7. Южно-уральский завод универсально-сборных приспособлений и технологической оснастки [Электронный ресурс] : Универсально-сборные приспособления (УСП) / Сайт производителя. – Электрон. текстовые данные. – Режим доступа : <http://uspto.ru/>. – Дата доступа : 16.04.2022.
8. Завод специальной взаимозаменяемой технологической оснастки [Электронный ресурс] : Каталоги СВТ / Сайт производителя. – Электрон. текстовые данные. – Режим доступа : <http://svto.info/>. – Дата доступа : 16.04.2022.
9. Гладков, К. М. Технология текстильного машиностроения / К. М. Гладков, Е. И. Глущенко, Б. И. Лившиц. – Москва : Машиностроение, 1966. – 439 с.
10. Маслов, Д. П. Технология машиностроения / Д. П. Маслов, В. В. Данилевский, В. В. Сасов. – Ленинград : Машгиз, 1957. – 424 с.
11. Каратыгин, А. М. Технология полиграфического машиностроения / А. М. Каратыгин [и др.]. – Москва : Книга, 1967. – 552 с.
12. Егоров, М. Е. Технология машиностроения / М. Е. Егоров, В. И. Дементьев, В. Л. Дмитриев ; под общ. ред. М. Е. Егорова. – Москва : Высшая школа, 1976. – 534 с.
13. Малкин, Я. А. Основы технологии механической обработки деталей машин / Я. А. Малкин. – Москва : Машгиз, 1961. – 199 с.
14. Гурин, Ф. В. Технология автотракторостроения / Ф. В. Гурин, В. Д. Клепиков, В. В. Рейн. – Москва : Машиностроение, 1971. – 344 с.

15. Яхин, А. Б. Технология приборостроения / А. Б. Яхин, В. П. Ефимов. – Москва : Оборонгиз, 1955. – 379 с.
16. Якобсон, М. О. Технология станкостроения / М. О. Якобсон. – Москва : Машиностроение, 1966. – 475 с.
17. Эттель, А. В. Технология сельскохозяйственного машиностроения / А. В. Эттель. – Москва : Машгиз, 1961. – 287 с.
18. Картавов, С. А. Технология машиностроения. Специальная часть : учеб. пособие для машиностроительных специальностей вузов / С. А. Картавов. – Киев : Вища школа, 1974. – 272 с.
19. Технология машиностроения. Специальная часть / Б. Л. Беспалов [и др.]. – Москва : Машиностроение, 1965. – 456 с.
20. Технология вагоностроения. Ремонт и надежность вагонов : учебник для техникумов по специальности «Вагоностроение» / Т. К. Батюшин [и др.]. – Москва : Машиностроение, 1990. – 360 с.
21. Данилевский, В. В. Технология машиностроения : учебник для техникумов / В. В. Данилевский. – 5-е изд., перераб. и доп. – Москва : Высшая школа, 1984. – 416 с.
22. Ковшов, А. Н. Технология машиностроения : учебник для студентов машиностроительных специальностей вузов / А. Н. Ковшов. – Москва : Машиностроение, 1987. – 320 с.
23. Мосталыгин, Г. П. Технология машиностроения : учебник / Г. П. Мосталыгин, Н. Н. Толмачевский. – Москва : Машиностроение, 1990. – 288 с.
24. Воробьев, Л. Н. Технология машиностроения и ремонт машин : учебник для вузов / Л. М. Воробьев. – Москва : Высшая школа, 1981. – 344 с.
25. Проектирование технологии : учебник для студентов машиностроительных специальностей вузов / И. М. Баранчукова [и др.] ; под общ. ред. Ю. М. Соломенцева. – Москва : Машиностроение, 1990. – 461 с.
26. Технология машиностроения (специальная часть) : учебник для машиностроительных специальностей вузов / А. А. Гусев [и др.]. – Москва : Машиностроение, 1986. – 480 с.
27. Капустин, Н. М. Технология производства гусеничных и колесных машин : учеб. пособие для студентов машиностроительных специальностей вузов / Н. М. Капустин ; под общ. ред. Н. М. Капустина. – Москва : Машиностроение, 1989. – 368 с.
28. Колесов, И. М. Основы технологии машиностроения : учебник для машиностроительных спец. вузов / И. М. Колесов. – Москва : Высшая школа, 1999. – 591 с.
29. Технология машиностроения. В 2 кн. Кн. 1. Основы технологии машиностроения : учеб. пособие для вузов / Э. Л. Жуков [и др.] ; под ред. С. Л. Мурашкина. – Москва : Высшая школа, 2003. – 278 с.

30. Безъязычный, В. Ф. Основы технологии машиностроения : учебник / В. Ф. Безъязычный. – Москва : Машиностроение, 2013. – 568 с.
31. Ильянков, А. И. Основные термины, понятия и определения в технологии машиностроения: Справочник : учебное пособие / А. И. Ильянков. – Москва : Академия, 2012. – 288 с.
32. Схиртладзе, А. Г. Проектирование технологических процессов в машиностроении / А. Г. Схиртладзе, В. П. Пучков, Н. М. Прис. – Старый Оскол : ТНТ, 2019. – 408 с.
33. Лебедев, Л. В. Технология машиностроения : учебник / Л. В. Лебедев, И. В. Шрубченко, А. А. Погонин. – Старый Оскол: ТНТ, 2018. – 336 с.
34. Мельников, А. С. Моделирование размерных связей в машине: учебное пособие / А. С. Мельников, М. А. Тамаркин, А. Н. Чукарин, Э. Э. Тищенко. – Старый Оскол: ТНТ, 2017. – 272 с.
35. Михайлов, А. В. Основы проектирования технологических процессов машиностроительных производств : учебное пособие / А. В. Михайлов, Д. А. Расторгуев, А. Г. Схиртладзе. – 2-е изд., стер. – Старый Оскол : ТНТ, 2018. – 336 с.
36. Передрей, Ю. М. Инженерные основы современных технологий. Технологии изготовления изделий : учебник / Ю. М. Передрей, В. В. Волков, А. Г. Схиртладзе. – 3-е изд., стер. – Старый Оскол : ТНТ, 2019. – 336 с.
37. Худобин Л. В. Базирование заготовок при механической обработке : учебное пособие / Л. В. Худобин, М. А. Белов, А. Н. Унянин – 4-е изд., стер. – Старый Оскол : ТНТ, 2020. – 248 с.
38. Маталин, А. А Технология машиностроения / А. А. Маталин. – Ленинград : Машиностроение, 1985. – 464 с.
39. Маталин, А. А Технология механической обработки / А. А. Маталин. – Ленинград : Машиностроение, 1977. – 464 с.
40. Серебряков, В. И. Материализация схем базирования заготовок установочными элементами / В. И. Серебряков // Машиностроение : сборник научных трудов ; под ред. И. П. Филонова. – Минск : УП «Технопринт», 2002. – Вып. 18. – С. 156–160.
41. Ракович, А. Г. Основы автоматизации проектирования технологических приспособлений / А. Г. Ракович ; под ред. Е. А. Стародетко. – Минск : Наука и техника, 1985. – 285 с.
42. Автоматизация проектирования ТП и средств оснащения / под ред. А. Г. Раковича. – Минск : Институт технической кибернетики НАН Беларуси, 1997. – 276 с.
43. Колкер, Я. Д. Базирование и базы в машиностроении : учебное пособие / Я. Д. Колкер. О. Н. Руднев. – Киев : Вища школа, 1991. – 100 с.

44. Байор, Б. Н. О развитии методологии базирования / Б. Н. Байор // СТИН. – 2000. – № 3. – С. 24–26.

45. Емельянов, В. Н. О разработке теоретических схем базирования / В. Н. Емельянов // СТИН. – 2002. – № 1. – С. 32–34.

46. Технология машиностроения : учебник для вузов. В 2 т. Т. 1. Основы технологии машиностроения / В. М. Бурцев [и др.] ; под ред. А. М. Дальского. – Москва : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 1997. – 564 с.

47. Колыбенко, Е. И. Системные знания теории базирования в машиностроении / Е. И. Колыбенко // Вестник машиностроения. – 2004. – № 6. – С. 58–62.

48. Колыбенко, Е. И. Системные знания теории базирования в машиностроении / Е. И. Колыбенко // Вестник машиностроения. – 2005. – № 11. – С. 49–55.

49. Технологические основы гибких производственных систем : учебник для машиностроительных специальностей вузов / В. А. Медведев [и др.] ; под ред. Ю. М. Соломенцева. – 2-е изд., испр. – Москва : Высшая школа, 2000. – 255 с.

50. Абрамов, Ф. Н. О разработке терминологии базирования в машиностроении / Ф. Н. Абрамов // Вестник машиностроения. – 2006. – № 2. – С. 67–72.

51. Абрамов Ф. Н. О классификации терминов базирования / Ф. Н. Абрамов // Вестник машиностроения. – 2006. – № 3. – С. 56–61.

52. Абрамов, Ф. Н. К вопросу о сущности базирования в машиностроении / Ф. Н. Абрамов // Вестник машиностроения. – 2007. – № 6. – С. 74–77.

53. Абрамов, Ф. Н. Влияние несовместности баз и погрешностей формы и взаимного расположения базовых поверхностей призматических заготовок на точность их базирования / Ф. Н. Абрамов // Вестник машиностроения. – 2007. – № 10. – С. 58–65.

54. Абрамов, Ф. Н. К вопросу об основных и дополнительных факторах, влияющих на точность базирования заготовок / Ф. Н. Абрамов // Вестник машиностроения. – 2009. – № 7. – С. 59–62.

55. Абрамов, Ф. Н. Точность базирования заготовок с отверстиями на цилиндрическом и срезанном пальцах / Ф. Н. Абрамов // Вестник машиностроения. – 2010. – № 1. – С. 58–66.

56. Абрамов, Ф. Н. К вопросу о базах и теоретических схемах базирования заготовок в центрах и на конических оправках / Ф. Н. Абрамов // Вестник машиностроения. – 2010. – № 12. – С. 53–58.

57. Абрамов, Ф. Н. Точность базирования заготовок типа валов в центрах / Ф. Н. Абрамов // Вестник машиностроения. – 2012. – № 3. – С. 63–66.

58. Абрамов, Ф. Н. Точность базирования заготовок типа втулок на конических оправках / Ф. Н. Абрамов // Вестник машиностроения. – 2012. – № 4. – С. 47–50.
59. Абрамов, Ф. Н. Базы и теоретические схемы базирования цилиндрических заготовок на призмах / Ф. Н. Абрамов // Вестник машиностроения. – 2012. – № 7. – С. 60–64.
60. Абрамов, М. Ф. Точность базирования заготовок типа дисков и втулок при их многоместной обработке / М. Ф. Абрамов // СТИН. – 2009. – № 10. – С. 34–36.
61. Абрамов, М. Ф. Точность базирования заготовок типа дисков и втулок при их многоместной обработке / М. Ф. Абрамов // СТИН. – 2009. – № 11. – С. 24–29.
62. Абрамов, М. Ф. Влияние погрешностей базирования призматических заготовок на точность расположения обработанных поверхностей / М. Ф. Абрамов // СТИН. – 2010. – № 2. – С. 18–22.
63. Абрамов, М. Ф. Влияние погрешностей базирования заготовок на точность выполняемых размеров / М. Ф. Абрамов // СТИН. – 2011. – № 1. – С. 17–26.
64. Голембиевский, А. И. Основы системологии способов формообразующей обработки в машиностроении / А. И. Голембиевский ; под ред. В. А. Петрова. – Минск : Наука и техника, 1986. – 168 с.
65. Базирование в проблеме разработки АСТПП / В. А. Клевцов [и др.] // Технологические исследования и разработки в системах автоматизированного проектирования : сборник научных трудов. – Владивосток, 1980. – С. 32–43.
66. Сысоев, Ю. С. Предложение по совершенствованию ГОСТ 21495-76 «Базирование и базы в машиностроении. Термины и определения» / Ю. С. Сысоев, С. А. Томилин // Вестник машиностроения. – 2008. – № 1. – С. 48–51.
67. Новоселов, Ю. А. Альтернативная концепция теории базирования в машиностроении / Ю. А. Новоселов // Вестник машиностроения. – 2009. – № 2. – С. 48–55.
68. Косов, М. Г. Квазидинамическое базирование / М. Г. Косов, Г. А. Фролова // СТИН. – 2007. – № 6. – С. 29–32.
69. Шейнин, Г. М. Погрешности базирования при обработке и контроле. / Г. М. Шейнин, М. Н. Бобков, Д. Е. Бочкова // СТИН. – 2019. – № 1. – С. 27–34.
70. Прилуцкий, В. А. Повышение точности установки заготовок при базировании по скрытым базам. / В. А. Прилуцкий // СТИН. – 2011. – № 4. – С. 13–23.
71. Ивахненко, А. Г. Базирование звеньев формообразующих систем металлорежущих станков на ранних этапах проектирования / А. Г. Ивахненко, В. В. Куц, М. Л. Сторублев, А. Н. Струков // Вестник машиностроения. – 2011. – № 3. – С. 54–60.

72. Кудряшов, Е. А. Основы технологии машиностроения : учебник / Е. А. Кудряшов, И. М. Смирнов, Е. И. Яцун ; под ред. Е. А. Кудряшова. – Старый Оскол : ТНТ, 2017. – 437 с.

73. Базров, Б. М. Классификация базирующих элементов станочных приспособлений / Б. М. Базров, Н. А. Родионова, Э. З. Насиров // Вестник машиностроения. – 2009. – № 11. – С. 53–63.

74. Базров, Б. М. Исследование влияния несовпадения технологических и конструкторских баз на точность координирующих размеров поверхностей детали / Б. М. Базров // Вестник машиностроения. – 2016. – № 9. – С. 3–8.

75. Базров, Б. М. Теория и практика базирования в машиностроении / Б. М. Базров // Вестник машиностроения. – 2017. – № 4. – С. 5–10.

76. Базров, Б. М. Практическое приложение теории базирования в машиностроении / Б. М. Базров // Вестник машиностроения. – 2017. – № 4. – С. 6–11.

77. Базров, Б. М. Методика классификации базирующих модулей поверхностей детали / Б. М. Базров, Н. А. Родионова // СТИН. – 2019. – № 12. – С. 25–27.

78. Базров, Б. М. Особенности базирования изделий, заготовок скрытыми базами / Б. М. Базров, Н. А. Родионова // СТИН. – 2020. – № 10. – С. 27–30.

79. Базров, Б. М. Совершенствование основ теории базирования с учетом развития традиционных и аддитивных технологий / Б. М. Базров, М. Л. Хейфец // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2020. – Т. 64, № 5. – С. 617–623.

80. Балакшин, Б. С. Основы технологии машиностроения / Б. С. Балакшин. – Москва : Машиностроение, 1966. – 556 с.

81. Базров, Б. М. Выбор баз для установки сменных элементов системы СПИД / Б. М. Базров // СТИН. – 1982. – № 5. – С. 24.

82. Проектирование технологии : учебник для вузов / И. М. Баранчукова [и др.] ; под ред. Ю. Б. Соломенцева. – Москва : Машиностроение, 1990. – 416 с.

83. Проектирование технологических процессов в машиностроении : учебное пособие для вузов / И. П. Филонов [и др.] ; под общ. ред. И. П. Филонова. – Минск : УП «Технопринт», 2003. – 910 с.

84. Карпусь, В. Е. Точность базирования валов в призмах / В. Е. Карпусь, В. А. Иванов. // Вестник машиностроения. – 2012. – № 2. – С. 40–45.

85. Санинский, В. А. Определение размера эталонного объекта с погрешностями базирования методом фотометрии с использованием плоскопараллельных концевых мер длины / В. А. Санинский, М. П. Горшенева, Д. В. Потехин, А. А. Силаев // Вестник машиностроения. – 2016. – № 1. – С. 42–43.

86. Печенин, В. А. Погрешности базирования при координатных измерениях цилиндрических зубчатых колес / В. А. Печенин, М. А. Болотов // Вестник машиностроения. – 2016. – № 5. – С. 47–50.
87. Беляков, Н. В. Формализация проектирования технологических процессов механической обработки корпусных деталей машин : научное издание / Н. В. Беляков, Е. И. Махаринский, Ю. Е. Махаринский. – Витебск : УО «ВГТУ», 2006. – 147 с.
88. Беляков, Н. В. Погрешность теоретической схемы установки / Н. В. Беляков, Е. И. Махаринский, Ю. Е. Махаринский // Вестник Витебского государственного технологического университета / УО «ВГТУ» ; гл. ред. В. С. Башметов. – Витебск : УО «ВГТУ», 2005. – Вып. 9. – С. 72–77.
89. Махаринский, Е. И. О теории базирования при механической обработке / Е. И. Махаринский, Ю. Е. Махаринский, Н. В. Беляков // СТИН. – 2005. – № 4. – С. 29–32.
90. Махаринский, Е. И. Методика синтеза индивидуальных технологических процессов изготовления корпусных деталей машин / Е. И. Махаринский, Н. В. Беляков // Вестник машиностроения. – № 2. – 2005. – С. 57–65.
91. Беляков, Н. В. Формализация синтеза технологических процессов механической обработки заготовок корпусных деталей машин / Н. В. Беляков // Материалы, технологии, инструменты. – 2006. – № 4. – С. 32–38.
92. Махаринский, Е. И. Базирование в задачах создания САПР процессов механической обработки и средств оснащения / Е. И. Махаринский, Н. В. Беляков, Ю. Е. Махаринский // Вестник ПГУ. – 2008. – № 2, Серия В. Прикладные науки. – С. 47–56.
93. Махаринский, Е. И. Теория базирования в проблеме проектирования технологических процессов механической обработки и станочных приспособлений / Е. И. Махаринский, Н. В. Беляков, Ю. Е. Махаринский // Вестник машиностроения. – 2008. – № 9. – С. 34–45.
94. Попок, Н. Н. Методы и модели компьютерного проектирования технологических процессов изготовления корпусных деталей / Н. Н. Попок, Н. В. Беляков // Вестник ПГУ. – 2010. – № 3, Серия В. Промышленность. Прикладные науки. – С. 68–75.
95. Горохов, В. А. Основы технологии машиностроения и формализованный синтез технологических процессов учебник для вузов : в 2-х ч. Ч. I. / Горохов В. А. [и др.]. – Старый Оскол : ТНТ, 2019. – 496 с.
96. Никифоров, С. О. Технология 2D- и 3D-печати, 3D-принтеры / С. О. Никифоров [и др.] // Вестник бурятского научного центра сибирского отделения РАН. – 2016. – № 4 (24). – С. 156–163.
97. Полторан, Я. Е. 3D-печать в современной промышленности / Я. Е. Полторан, К. А. Ведищев // Аллея науки. – 2019. – Т.1, № 7(34). – С. 3–6.

98. Зленко, М. А. Аддитивные технологии в машиностроении. Пособие для инженеров / М. А. Зленко, М. В. Нагайцев, В. М. Довбыш. – Москва : ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ», 2015. – 220 с.

99. 3DToday [Электронный ресурс] : О «правильном» и «неправильном» расположении моделей при печати на фотополимерном принтере / Сайт производителя. – Электрон. текстовые данные. – Режим доступа : <https://3dtoday.ru/blogs/pl32/o-pravilnom-i-nepravilnom-raspolozenii-modelei-pri-pecati-na-fotopolimernom-printere>. – Дата доступа : 7.04.2022.

100. 3DPrinter [Электронный ресурс] : Как ориентация детали влияет на 3D-печать? / Сайт производителя. – Электрон. текстовые данные. – Режим доступа : <https://3dprinter.ua/kak-orientacija-detali-vlijaet-na-3d-pechat/>. – Дата доступа : 7.04.2022.

101. Савицкий, В. В. Исследование параметров 3D-печати на размерную точность изделий / В. В. Савицкий, А. Н. Голубев, Д. И. Быковский // Вестник ВГТУ. – 2018. – № 2(35). – С. 52–61.

102. Зверовщиков, А. Е. Исследование точности размеров, обеспечиваемых технологией 3D-печати / А. Е. Зверовщиков, Д. А. Шелахаев, С. А. Нестеров // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2019. – № 1 (49). – С. 66–78.

103. Гусев, Д. В. Повышение показателей качества изготавливаемых изделий при использовании технологии быстрого прототипирования [Текст] : автореф. дис. канд. техн. наук : 05.02.08 / Гусев Денис Витальевич ; ФГБОУ ВО «УлГТУ». – Ульяновск, 2019. – 17 с.

104. Попов, С. Ю. Программное обеспечение подготовки 3D-моделей к 3D-печати / С. Ю. Попов, А. Н. Зеленина, Н. М. Токарева // Вестник воронежского института высоких технологий. – 2019. – № 2 (29). – С. 33–39.

105. Блохин, А. В. Печать трехмерных объектов с использованием оптимальных настроек 3D-принтера / А. В. Блохин, А. А. Сапилова, П. Н. Абашкина // Научно-практические исследования. – 2019. – № 8-3(23). – С. 24–28.

106. Iscar [Электронный ресурс] : МР / Сайт производителя. – Электрон. текстовые данные. – Режим доступа : <https://mpwr.iscar.com/MachiningPower>. – Дата доступа : 02.04.2022.

107. Sandvikcoromant [Электронный ресурс] : режимы резания / Сайт производителя. – Электрон. текстовые данные. – Режим доступа : <https://www.sandvik.coromant.com/ru-ru/products/Pages/toolguide.aspx>. – Дата доступа : 26.03.2022.

108. Walter [Электронный ресурс] : калькулятор для расчета режимов резания / Сайт производителя. – Электрон. текстовые данные. – Режим доступа : <https://www.walter-tools.com/ru-ru/press/media-portal/apps/tools-more/pages/default.aspx>. – Дата доступа : 26.03.2022.

109. Бортс, А. В приоритете разработчика – повышение эффективности программирования обработки на станках с ЧПУ. Что нового в Mastercam 2021 / А. Бортс, В. Воржаков // CAD/CAM/CAE Observer. – 2020. – № 4 (136). – С. 58–63.

110. Основы разработки управляющих программ для станков с ЧПУ в системе Siemens NX : учебное пособие / М. С. Аносов [и др.] ; Нижегород. гос. техн. ун-т. им. Р. Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2019. – 110 с.

111. Компас-3D. Модуль ЧПУ [Электронный ресурс] : Фрезерная обработка / Сайт производителя. – Электрон. текстовые данные. – Режим доступа : <https://kompas.ru/kompas-3d/application/machinery/module-chpu-fo/>. – Дата доступа : 26.03.2022.

112. Hexagon. ManufacturingIntelligence [Электронный ресурс] : edgcam / Сайт производителя. – Электрон. текстовые данные. – Режим доступа : <http://www.edgcamsoftware.ru/edgcam-mill-turn/>. – Дата доступа : 26.03.2022.

113. SolidCAM. TheLeadersinintegratedCAM [Электронный ресурс] : SolidCAM – полноценное CAMhtitybt / Сайт производителя. – Электрон. текстовые данные. – Режим доступа : <https://www.solidcam.com/ru/cam-resheniya/moduli-cam/>. – Дата доступа : 26.03.2022.

114. Долматовский, Г. А. Справочник технолога по обработке металлов резанием / Г. А. Долматовский. 3-е изд., перераб. – Москва : Машгиз, 1962. – 1228 с.

115. Справочник технолога-машиностроителя : в 2 т. Т. 2 / под ред. А. М. Дальского, А. Г. Косиловой, Р. К. Мещерякова, А. Г. Сулова. – 5-е изд., перераб. и доп. – Москва : Машиностроение, 2001. – 941 с.

116. Справочник технолога машиностроителя. В 2 т. Т. 2 / под ред. А. С. Васильева, А. А. Кутина. – 6-е изд., перераб. и доп. – Москва : Инновационное машиностроение, 2018. – 818 с.

117. Соколовский, А. П. Курс технологии машиностроения / А. П. Соколовский. – Москва : Машгиз, 1947. – 343 с.

118. Система ускоренной технологической подготовки производства на базе комплексной стандартизации ее элементов. – Москва : Издательство стандартов, 1972. – 32 с.

119. Применение ЭВМ в технологической подготовке серийного производства / С. П. Митрофанов [и др.]. – Москва : Машиностроение, 1981. – 287 с.

120. Митрофанов, С. П. Автоматизация технологической подготовки серийного производства / С. П. Митрофанов, Ю. А. Гульнов, Д. Д. Куликов. – Москва : Машиностроение, 1974. – 360 с.

121. Митрофанов, С. П. Групповая технология машиностроительного производства : в 2 т. / С. П. Митрофанов. – 3-е изд., перераб. и доп. – Ленинград : Машиностроение, 1983.

122. Технологическая подготовка гибких производственных систем / С. П. Митрофанов [и др.] ; под общ. ред. С. П. Митрофанова. – Ленинград : Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1987. – 352 с.

123. Автоматизация технологической подготовки производства для обработки корпусных деталей на многоцелевых станках с ЧПУ и ГПС на их основе : методические рекомендации / В. Н. Кирьянов [и др.]. – Москва : ЭНИМС, 1985. – 99 с.

124. Шрайбман, С. М. Технологическая подготовка обработки корпусных деталей на многоинструментальных станках с ЧПУ / С. М. Шрайбман, М. А. Эстерзон. – Москва : Наука, 1978. – 51 с.

125. Гусев, Ю. В. Экспериментальная отработка типовых технологических процессов обработки основных видов поверхностей плоских и корпусных деталей в зависимости от размеров, класса точности, шероховатости поверхностей : методические рекомендации / Ю. В. Гусев, А. А. Щукин, В. И. Гранкин. – Москва : Ин-т «Оргстанкинпром», 1979. – 151 с.

126. Операционная технология обработки деталей на многооперационных фрезерных станках с ЧПУ : методические рекомендации / М. А. Эстерзон, С. М. Шрайбман ; под ред. М. Е. Юхвида. – Москва : ЭНИМС, 1977. – 73 с.

127. РТМ 2-040-45–74 Технологический регламент. Механическая обработка деталей типа корпусов шпиндельных бабок прецизионных металлорежущих станков средних размеров в условиях серийного и мелкосерийного производства. – Взамен ОС2-040-23–67 ; ОС2-040-49–68 : утв. М-вом станкостроительной и инструментальной пром-сти 27.12.74 : срок действия установлен с 01.07.75 до 01.07.78. – Москва : НИИМАШ, 1975. – 42 с.

128. РТМ 2-040-43–74. Технологический регламент. Механическая обработка деталей типа столов прецизионных металлорежущих станков средних размеров в условиях серийного и мелкосерийного производства. – Взамен ОС 2-040-6–67 : утв. М-вом станкостроительной и инструментальной пром-сти 27.12.74 : срок действия установлен с 01.07.75 до 01.07.78. – Москва : НИИМАШ, 1975. – 40 с.

129. РТМ 2-040-42–74. Технологический регламент. Механическая обработка деталей типа стоек и колонок прецизионных металлорежущих станков средних размеров в условиях серийного и мелкосерийного производства. – Взамен ОС2-040-4–67 : утв. М-вом станкостроительной и инструментальной пром-сти 27.12.74 : срок действия установлен с 01.07.75 до 01.07.78. – Москва : НИИМАШ, 1975. – 31 с.

130. РТМ 2-040-40–74. Технологический регламент. Механическая обработка деталей типа корпусов коробок подач, коробок скоростей, фартуков прецизионных металлорежущих станков средних размеров в условиях серийного и мелкосерийного производства. – Взамен ОС2-040-2–67 : утв. Мин. станкостроительной и инструментальной

пром-сти 27.12.74 : срок действия установлен с 01.07.75 до 01.07.78. – Москва : НИИМАШ, 1975. – 40 с.

131. Махаринский, Е. И. Основы технологии машиностроения : учебник / Е. И. Махаринский, В. А. Горохов. – Минск : Вышэйшая школа, 1997. – 423 с.

132. Шпур, Г. Автоматизированное проектирование в машиностроении / Г. Шпур, Ф.-Л. Краузе ; пер. с нем. Г. Д. Волковой [и др.] ; под ред. Ю. М. Соломенцева, В. П. Диденко. – Москва : Машиностроение, 1988. – 648 с.

133. Михалев, С. Б. Автоматизация процессов подготовки производства / С. Б. Михалев. – Минск : Беларусь, 1973. – 288 с.

134. Гривачевский, А. Г. Системы кодирования контура плоской детали применительно к задачам геометрического анализа / А. Г. Гривачевский, А. Г. Горелик, Д. М. Зозулевич // Вычислительная техника в машиностроении / ИТК АН БССР. – Минск, 1965. – Вып. 1. – С. 144–147.

135. Горелик, А. Г. Система кодирования геометрической информации о контурах плоских деталей // Вычислительная техника в машиностроении / ИТК АН БССР. – Минск, 1965. – Вып. 1. – С. 148–170.

136. Кочуров, В. А. Система кодирования конструкторской и технологической подготовки производства в машиностроении / В. А. Кочуров // Вычислительная техника в машиностроении / ИТК АН БССР. – Минск, 1976. – Вып. 3. – С. 29.

137. Методика. Правила формализованного представления конструкторской и технологической информации. – Москва : Изд-во стандартов, 1976. – 70 с.

138. Мауэргаус, Ю. Е. Геометрическое моделирование чертежей деталей в системе технической подготовки производства / Ю. Е. Мауэргаус // Вестник машиностроения. – 1991. – № 2. – С. 55.

139. Применение ЭВМ в технологической подготовке серийного производства / С. П. Митрофанов [и др.]. – Москва : Машиностроение, 1981. – 287 с.

140. Авербах, А. З. О единой системе кодирования информации при автоматизации подготовки производства в машиностроении / А. З. Авербах // Вычислительная техника в машиностроении / ИТК АН БССР. – Минск, 1965. – Вып. 1. – С. 211–237.

141. Махаринский, Е. И. Рационализация описания продукта производства / Е. И. Махаринский, Б. Н. Сухиненко // Сборник научных трудов ВГТУ. – Витебск : ВГТУ, 1995. – С. 15–17.

142. Горанский, Г. К. Система кодирования информации при машиностроительном проектировании / Г. К. Горанский // Вычислительная техника в машиностроении / ИТК АН БССР. – Минск, 1965. – Вып. 1. – С. 38–120.

143. Горанский, Г. К. Внутренний язык автоматизированных систем проектирования в машиностроении / Г. К. Горанский, Д. М. Зозулевич, Д. Р. Шерлинг. – Минск : ИТК АН БССР, 1968. – 112 с.
144. Элементы теории автоматизации машиностроительного проектирования с помощью вычислительной техники / Г. К. Горанский [и др.]. – Минск : Наука и техника, 1970. – 51 с.
145. Горанский, Г. К. Технологическое проектирование в комплексных автоматизированных системах подготовки производства / Г. К. Горанский, Э. И. Бендерова. – Москва : Машиностроение, 1981. – 456 с.
146. Информационно-поисковая система технологического назначения / под общ. ред. Н. А. Яρμοша. – Минск : ИТК АН БССР, 1978. – 159 с.
147. Яρμοш, Н. А. Автоматизация информационных процессов проектирования / Н. А. Яρμοш. – Минск : Наука и техника, 1984. – 256 с.
148. Цветков, В. Д. Система кодирования и вопросы построения информационного языка для описания исходной информации при технологическом проектировании / В. Д. Цветков // Вычислительная техника в машиностроении / ИТК АН БССР. – Минск, 1965. – Вып. 1. – С. 193–210.
149. Цветков, В. Д. Система автоматизированного проектирования технологических процессов / В. Д. Цветков. – Москва : Машиностроение, 1972. – 240 с.
150. Цветков, В. Д. Системно-структурное моделирование и автоматизация проектирования технологических процессов / В. Д. Цветков. – Минск : Наука и техника, 1979. – 256 с.
151. Цветков, В. Д. Проблемно-ориентированные языки систем автоматизированного технологического проектирования / В. Д. Цветков, А. И. Петровский, А. А. Толкачев ; под ред. П. И. Ящерицына. – Минск : Наука и техника, 1984. – 192 с.
152. Старец, А. С. Опыт разработки и внедрения системы автоматизации технологического проектирования на предприятиях с серийным характером производства / А. С. Старец. – Киев : Знание, 1983. – 24 с.
153. Системы автоматизированного проектирования изделий и технологических процессов в машиностроении / Р. А. Аллик [и др.] ; под общ. ред. Р. А. Аллика. – Ленинград : Машиностроение, 1986. – 287 с.
154. Системы автоматизированного проектирования технологических процессов, приспособлений и режущих инструментов / С. Н. Корчак [и др.] ; под общ. ред. С. Н. Корчака. – Москва : Машиностроение, 1988. – 352 с.

155. Куликов, Д. Д. Язык описания операционных заготовок / Д. Д. Куликов, Е. И. Яблочников // Автоматизация технической подготовки производства / ИТК АН БССР. – Минск, 1986. – С. 114–112.

156. Куликов, Д. Д. Метод кодирования операционных заготовок для механической обработки деталей / Д. Д. Куликов // Автоматизация технической подготовки производства / ИТК АН БССР. – Минск, 1985. – С. 85–93.

157. Боголюбов, Я. М. Система поддержки принятия решений при проектировании технологических процессов обработки на агрегатных станках / Я. М. Боголюбов, Н. Н. Гущинский, Г. Н. Левин // Моделирование интеллектуальных процессов проектирования, производства и управления : сборник научных трудов / под ред. В. И. Махнача ; Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси. – Минск, 2003. – С. 191–198.

158. Махнач, В. И. Алгоритмизация проектирования технологических процессов механообработки на основе матричного представления проектных решений / В. И. Махнач, Г. К. Горанский, А. Г. Гривачевский // Моделирование и информационные технологии проектирования : сборник научных трудов / ИТК НАНБ. – Минск, 2000. – С. 4–11.

159. Червяков, Л. М. Моделирование технологических решений / Л. М. Червяков // СТИН. – 1997. – № 4. – С. 24–28

160. Старостин, В. Г. Синтез структур маршрутно-операционных технологических процессов обработки резанием / В. Г. Старостин // СТИН. – 1992. – № 8. – С. 27–30.

161. Старостин, В. Г. Формализация проектирования процессов обработки резанием / В. Г. Старостин, В. Е. Лелюхин. – Москва : Машиностроение, 1986. – 136 с.

162. Махаринский, Е. И. Формализация проектирования технологических процессов механической обработки / Е. И. Махаринский [и др.] // Вестник Витебского государственного технологического университета / УО «ВГТУ». – Витебск : УО «ВГТУ», 1995. – Вып. 1. – С. 65–67.

163. Гольдфельд, М. Х. Некоторые вопросы формализации этапов проектирования структуры технологического процесса механической обработки / М. Х. Гольдфельд // Автоматизация технической подготовки производства / Ин-т технической кибернетики АН БССР. – Минск, 1982. – Вып. 1. – С. 54–64.

164. Челищев, Б. Е. Автоматизированные системы технологической подготовки производства / Б. Е. Челищев, И. В. Боброва. – Москва : Энергия, 1975. – 136 с.

165. Саратов, А. А. Математическое моделирование процесса выбора баз при машинном проектировании технологических процессов / А. А. Саратов // Автоматизация технической подготовки производства /

Ин-т технической кибернетики АН БССР. – Минск, 1975. – Вып. 19. – С. 54–64.

166. Технология газонефтяного и нефтехимического машиностроения : учебное пособие / Б. М. Базров [и др.] ; под общ. ред. Б. М. Базрова. – Москва : Машиностроение, 1986. – 256 с.

167. Базров, Б. М. Модульная технология производства деталей / Б. М. Базров // Вестник машиностроения. – 1987. – № 11. – С. 47–52.

168. Базров, Б. М. Концепция модульного построения механосборочного производства / Б. М. Базров // СТИН. – 1989. – № 11. – С. 16–19.

169. Сорокин, А. И. Модульные технологические процессы изготовления деталей / А. И. Сорокин, Ю. Л. Рыбальченко, Т. А. Чернова // СТИН. – 1989. – № 11. – С. 20–21.

170. Новиков, О. А. Автоматизированное проектирование модульных технологических процессов / О. А. Новиков, А. Я. Тянтов // СТИН. – 1989. – № 11. – С. 21–26.

171. Рыбальченко, Ю. Л. Инструментальное обеспечение модульных технологических процессов / Ю. Л. Рыбальченко, М. З. Хостикоев // СТИН. – 1989. – № 11. – С. 26–29.

172. Сорокин, А. И. Построение систем переналаживаемых станочных приспособлений при модульной технологии / А. И. Сорокин // СТИН. – 1989. – № 11. – С. 29–32.

173. Базров, Б. М. Внедрение модульного технологического процесса на участке токарных станков с ЧПУ / Б. М. Базров, В. А. Губарь, И. И. Палийчук // СТИН. – 1989. – № 11. – С. 32–36.

174. Базров, Б. М. Модульный принцип построения механосборочного производства / Б. М. Базров // Вестник машиностроения. – 1993. – № 12. – С. 18–23.

175. Базров, Б. М. Концепция модульного построения технологических средств механосборочного производства / Б. М. Базров // Вестник машиностроения. – 1996. – № 2. – С. 28.

176. Попок, Н. Н. Мобильная реорганизация машиностроительного производства / Н. Н. Попок. – Минск, УП «Технопринт», 2001. – 396 с.

177. Попок, Н. Н. Обеспечение мобильности машиностроительного производства на основе технологических модулей / Н. Н. Попок // Вестник ПГУ, сер. В. – 2009. – № 8. – С. 123–129.

178. Губич, Л. В. Автоматизация процессов проектирования в машиностроении / Л. В. Губич. – Минск : ОИПИ НАН Беларуси, 2002. – 308 с.

179. Применение метода направленного поиска при определении технологического маршрута механической обработки корпусных деталей / А. И. Дашенко [и др.] // Автоматизация технической подготовки

производства / Ин-т технической кибернетики АН БССР. – Минск, 1976. – Вып. 18. – С. 82–91.

180. Дащенко, А. И. Проектирование автоматических линий / А. И. Дащенко, А. П. Белоусов. – Минск : Высшая школа, 1983. – 394 с.

181. Автоматизация проектирования технологических процессов в машиностроении / В. С. Корсаков [и др. ] ; под общ. ред. Н. М. Капустина. – Москва : Машиностроение, 1985. – 304 с.

182. Комисаров, В. И. Точность, производительность и надежность в системах проектирования технологических процессов / В. И. Комисаров, В. И. Леонтьев. – Москва : Машиностроение, 1985. – 219 с.

183. Боголюбов, Я. М. Система поддержки принятия решений при проектировании технологических процессов обработки на агрегатных станках / Я. М. Боголюбов, Н. Н. Гущинский, Г. Н. Левин // Моделирование интеллектуальных процессов проектирования, производства и управления : сборник научных трудов / под ред. В. И. Махнача ; Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси. – Минск, 2003. – С. 191–198.

184. Попок, Н. Н. Практическое приложение теории базирования для синтеза универсально-сборных приспособлений / Н. Н. Попок, Н. В. Беляков, Ю. Е. Махаринский, Д. Г. Латушкин // Вестник ПГУ. – 2020. – № 11, Серия В. Промышленность. Прикладные науки. – С. 21–31.

185. Беляков, Н. В. Методическое, алгоритмическое и программное обеспечение синтеза универсально-сборных приспособлений / Н. В. Беляков, Н. Н. Попок, Ю. Е. Махаринский, Д. Г. Латушкин // Вестник ВГТУ. – 2020. – № 2(39). – С. 14–27.

186. Беляков, Н. В. САПР универсально-сборных станочных приспособлений для корпусных деталей / Н. В. Беляков, Ю. Е. Махаринский, Н. Н. Попок // Инновационные технологии в машиностроении [Электронный ресурс] : электронный сборник материалов международной научно-технической конференции, посвященной 50-летию машиностроительных специальностей и 15-летию научно-технологического парка Полоцкого государственного университета, Новополоцк, 21–22 апр. 2020 г. / Полоц. гос. у-нт. ; под ред. чл.-корр., д-ра техн. наук, проф. В. К. Шелега ; д-ра техн. наук, проф. Н. Н. Попка. – Новополоцк : Полоц. гос. у-нт, 2020. – С. 34–36.

187. Беляков, Н. В. Система поддержки принятия решений синтеза универсально-сборных приспособлений для корпусных деталей / Н. В. Беляков, Ю. Е. Махаринский, Н. Н. Попок // «Перспективные направления развития технологии машиностроения и металлообработки» «Технология – Оборудование – Инструмент – Качество» : тезисы докл. междуна. науч.-техн. конф. (Минск, 8 апреля 2021 г.) / редкол. : В. К. Шелег (отв. ред.) [и др.]. – Минск : Бизнесофсет, 2021. – С. 35–37.

188. Попок, Н. Н. Система поддержки принятия решений по базированию моделей деталей машин в рабочей зоне 3D-принтеров / Н. Н. Попок, Н. В. Беляков, Д. А. Яснев // Вестник ПГУ. – 2022. – № 3, Серия В. Промышленность. Прикладные науки. Машиноведение и машиностроение – С. 9–20.

189. Попок, Н. Н. Технологическое обеспечение допусков взаимного расположения поверхностей при печати деталей машин на 3D-принтерах / Н. Н. Попок, Н. В. Беляков, Д. А. Яснев, Е. М. Тихон // Менеджмент качества производственных, социально-экономических и технических систем : развитие и совершенствование. Сборник научных трудов / под редакцией А. П. Симкина, Т. П. Можяевой. – Брянск : БГТУ, 2022. – С. 80–87.

190. Методическое, алгоритмическое и программное обеспечение базирования моделей деталей машин в рабочей зоне 3D-принтеров / Н. В. Беляков [и др.] // Перспективные направления развития технологии машиностроения и металлообработки. Технология – Оборудование – Инструмент – Качество : тезисы докладов 36-й Международной научно-технической конференции в рамках международной специализированной выставки «Машиностроение/Металлообработка-2022», (Минск, 7 апреля 2022 г.) / редкол.: В. К. Шелег (отв. ред.) [и др.]. – Минск : Бизнесофсет, 2022. – С. 12–13.

191. Беляков, Н. В. Система автоматизации прогнозирования точности допусков взаимного расположения поверхностей при 3D-печати / Н. В. Беляков, Д. А. Яснев, М. Э. Эбако // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : материалы Междунар. науч.-техн. конф. / М-во образования Респ. Беларусь, М-во науки и высшего образования Рос. Федерации, Белорус.-Рос. ун-т ; редкол. : М. Е. Лустенков (гл. ред.) [и др.]. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2022. – С. 42–43.

192. Беляков Н. В. Система автоматизированного расчета параметров размерной настройки концевых фрез для обработки плоских поверхностей на станках с ЧПУ/ Н. В. Беляков [и др.] // Вестник ВГТУ. – 2021. – № 40 (1). – С. 39–50.

193. Попок, Н. Н. Система поддержки принятия решений по размерной настройке торцевых фрез для программирования обработки на станках с ЧПУ / Н. Н. Попок, Н. В. Беляков, В. В. Янович // Вестник ПГУ. – 2021. – № 11, Серия В. Промышленность. Прикладные науки. – С. 7–17.

194. Беляков, Н. В. Система автоматизированного расчета параметров размерной настройки торцевых фрез / Н. В. Беляков, В. В. Беган, В. В. Янович // Материалы докладов 54-й международной научно-технической конференции преподавателей и студентов. В 2-х томах. Том 2. / УО «ВГТУ». – Витебск, 2021. – С. 262–264.

195. Беляков, Н. В. Система автоматизированного расчета основного времени фрезерования плоских поверхностей / Н. В. Беляков,

В. В. Беган, В. В. Янович // Тезисы докладов 53-й международной научно-технической конференции преподавателей и студентов / УО «ВГТУ». – Витебск, 2020. – С. 252.

196. Беляков, Н. В. Методика определения величин врезания торцовых фрез / Н. В. Беляков, В. В. Беган, В. В. Янович // Тезисы докладов 54-й международной научно-технической конференции преподавателей и студентов / УО «ВГТУ». – Витебск, 2021. – С. 289.

197. Беляков, Н. В. Современные тенденции развития оборудования и инструмента для изготовления деталей машин : учебное пособие / Н. В. Беляков, В. А. Горохов. – Витебск : УО «ВГТУ», 2021. – 639 с.

198. Научные основы технологии машиностроения : учебное пособие. В 2-ч. Ч. 1 / Н. В. Беляков [и др.]. – Витебск : УО «ВГТУ», 2021. – 309 с.

## Приложения

### Приложение А

#### Таблицы однозначности задания ориентации поверхностей

Таблица А.1 – Состав баз № 1

Обозначение	Допуск	Формула ориентации
$O_{10}$	перпендикулярности рассматриваемой оси поверхности вращения (ОПВ) к одной из плоскостей комплекта баз	$O_{10} \perp P_{i(j,k)}$
$O_{11}$	параллельности рассматриваемой ОПВ относительно двух плоскостей комплекта баз	$O_{11} // P_i \wedge P_j$
$O_{12}$	параллельности рассматриваемой ОПВ относительно одной плоскости и углового расположения относительно другой плоскости комплекта баз	$O_{12} // P_i \wedge O_{12} \angle P_{k,j}$
$O_{13}$	углового расположения рассматриваемой ОПВ относительно двух плоскостей комплекта баз	$O_{13} \angle P_i \wedge O_{13} \angle P_j$
$\Pi_{10}$	перпендикулярности рассматриваемой плоскости к двум плоскостям комплекта баз	$\Pi_{10} \perp P_i \wedge P_j$
$\Pi_{11}$	параллельности рассматриваемой плоскости к одной плоскости комплекта баз	$\Pi_{11} // P_i \dots$
$\Pi_{12}$	перпендикулярности рассматриваемой плоскости к одной плоскости комплекта и углового расположения относительно другой	$\Pi_{12} \perp P_i \wedge \Pi_{12} \angle P_{k,j}$
$\Pi_{13}$	углового расположения рассматриваемой плоскости относительно двух плоскостей комплекта баз	$\Pi_{13} \angle P_i \wedge \Pi_{13} \angle P_j$

Таблица А.2 – Состав баз № 2

Обозначение	Допуск	Формула ориентации
1	2	3
$O_{20}$	перпендикулярности рассматриваемой ОПВ плоскости комплекта перпендикулярной оси	$O_{20} \perp P_i$
$O_{21}$	перпендикулярности рассматриваемой ОПВ плоскости комплекта баз параллельной оси комплекта	$O_{21} \perp P_j$
$O_{22}$	параллельности рассматриваемой ОПВ относительно оси комплекта баз	$O_{22} // O_l$
$O_{23}$	перпендикулярности рассматриваемой ОПВ к оси комплекта баз и параллельности к плоскости комплекта, параллельной оси	$O_{23} \perp O_l \wedge O_{23} // P_j$
$O_{24}$	параллельности рассматриваемой ОПВ относительно плоскостей комплекта	$O_{24} // P_j \wedge O_{24} // P_i$
$O_{25}$	параллельности рассматриваемой ОПВ относительно плоскости комплекта параллельной оси и углового расположения относительно другой плоскости комплекта	$O_{25} // P_j \wedge O_{25} \angle P_i$
$O_{26}$	углового расположения рассматриваемой ОПВ относительно двух плоскостей комплекта	$O_{26} \angle P_j \wedge O_{26} \angle P_i$
$O_{27}$	параллельности рассматриваемой ОПВ относительно плоскости комплекта параллельной оси и углового расположения относительно оси комплекта	$O_{27} // P_j \wedge O_{27} \angle O_l$

Окончание таблицы А.2

1	2	3
$O_{28}$	углового расположения рассматриваемой ОПВ относительно плоскости комплекта параллельной оси и углового расположения относительно оси	$O_{28} \angle P_j \wedge O_{28} \angle O_l$
$O_{29}$	параллельности рассматриваемой ОПВ относительно плоскости комплекта перпендикулярной оси комплекта баз и углового расположения относительно другой плоскости комплекта	$O_{25} // P_i \wedge O_{26} \angle P_j$
$P_{20}$	перпендикулярности рассматриваемой плоскости к двум плоскостям комплекта баз	$P_{20} \perp P_i \wedge P_j$
$P_{21}$	параллельности рассматриваемой плоскости к плоскости комплекта баз параллельной оси	$P_{21} // P_j$
$P_{22}$	параллельности рассматриваемой плоскости к плоскости комплекта баз перпендикулярной оси	$P_{22} // P_i$
$P_{23}$	перпендикулярности рассматриваемой плоскости к оси комплекта баз	$P_{23} \perp O_l$
$P_{24}$	параллельности рассматриваемой плоскости к оси комплекта и перпендикулярности плоскости комплекта параллельной оси	$P_{24} // O_l \wedge P_{24} \perp P_j$
$P_{25}$	углового расположения рассматриваемой плоскости относительно плоскости комплекта перпендикулярной оси и перпендикулярности плоскости к плоскости комплекта параллельной оси	$P_{25} \angle P_i \wedge P_{25} \perp P_j$
$P_{26}$	углового расположения рассматриваемой плоскости относительно плоскости комплекта параллельной оси и перпендикулярности плоскости к плоскости комплекта перпендикулярной оси	$P_{26} \angle P_j \wedge P_{26} \perp P_i$
$P_{27}$	углового расположения рассматриваемой плоскости относительно оси комплекта и перпендикулярности плоскости к плоскости комплекта параллельной оси	$P_{27} \angle O_l \wedge P_{27} \perp P_j$
$P_{28}$	углового расположения рассматриваемой плоскости относительно оси комплекта и углового расположения к плоскости комплекта параллельной оси	$P_{28} \angle O_l \wedge P_{28} \angle P_j$
$P_{29}$	углового расположения рассматриваемой плоскости относительно двух плоскостей комплекта	$P_{29} \angle P_j \wedge P_{29} \angle P_i$

Таблица А.3 – Состав баз № 3

Обозначение	Допуск	Формула ориентации
1	2	3
$O_{30}$	перпендикулярности рассматриваемой ОПВ плоскости комплекта баз	$O_{30} \perp P_i$
$O_{31}$	параллельности рассматриваемой ОПВ относительно оси	$O_{31} // O_l \vee O_n$
$O_{32}$	перпендикулярности рассматриваемой ОПВ плоскости комплекта, образованного пересечением осей	$O_{32} \perp \{O_n O_l\}$
$O_{33}$	параллельности рассматриваемой ОПВ плоскости комплекта, образованного пересечением осей, и параллельности рассматриваемой ОПВ к плоскости комплекта	$O_{33} // \{O_n O_l\} \wedge O_{33} // P_i$
$O_{34}$	параллельности рассматриваемой ОПВ плоскости комплекта, образованного пересечением осей, и углового расположения оси к плоскости комплекта	$O_{34} // \{O_n O_l\} \wedge O_{34} \angle P_i$

Окончание таблицы А.3

1	2	3
O <sub>35</sub>	углового расположения рассматриваемой ОПВ плоскости комплекта, образованного пересечением осей, и углового расположения рассматриваемой ОПВ к плоскости комплекта	$O_{35} \angle \{O_n O_l\} \wedge O_{35} \angle P_i$
O <sub>36</sub>	параллельности рассматриваемой ОПВ плоскости комплекта, образованного пересечением осей, и углового расположения оси к оси комплекта баз	$O_{36} // \{O_n O_l\} \wedge O_{36} \angle O_l \vee O_n$
O <sub>37</sub>	углового расположения рассматриваемой ОПВ плоскости комплекта, образованного пересечением осей, и параллельности ОПВ к плоскости комплекта	$O_{37} \angle \{O_n O_l\} \wedge O_{37} // P_i$
O <sub>38</sub>	углового расположения рассматриваемой ОПВ плоскости комплекта, образованного пересечением осей, и углового расположения ОПВ к оси комплекта.	$O_{38} \angle \{O_n O_l\} \wedge O_{38} \angle O_l \vee O_n$
П <sub>30</sub>	перпендикулярности рассматриваемой плоскости к двум плоскостям комплекта	$P_{30} \perp P_i \wedge \{O_n O_l\}$
П <sub>31</sub>	параллельности рассматриваемой плоскости к плоскости комплекта, образованного пересечением осей	$P_{31} // \{O_n O_l\}$
П <sub>32</sub>	параллельности рассматриваемой плоскости к плоскости комплекта	$P_{32} // P_i$
П <sub>33</sub>	перпендикулярности рассматриваемой плоскости оси комплекта	$P_{33} \perp O_l \vee O_n$
П <sub>34</sub>	перпендикулярности рассматриваемой плоскости к плоскости комплекта и углового расположения к плоскости комплекта, образованного пересечением осей	$P_{34} \perp P_i \wedge P_{34} \angle \{O_n O_l\}$
П <sub>35</sub>	углового расположения рассматриваемой плоскости к плоскости комплекта и перпендикулярности к плоскости комплекта, образованного пересечением осей	$P_{35} \angle P_i \wedge P_{35} \perp \{O_n O_l\}$
П <sub>36</sub>	углового расположения рассматриваемой плоскости к плоскости комплекта, углового расположения к плоскости комплекта, образованного пересечением осей	$P_{36} \angle P_i \wedge P_{36} \angle \{O_n O_l\}$
П <sub>37</sub>	углового расположения рассматриваемой плоскости к оси комплекта и углового расположения к плоскости комплекта, образованного пересечением осей	$P_{37} \angle O_l \vee O_n \wedge P_{37} \angle \{O_n O_l\}$

Таблица А.4 – Состав баз № 4

Обозначение	Допуск	Формула ориентации
1	2	3
O <sub>40</sub>	перпендикулярности рассматриваемой ОПВ плоскости комплекта баз	$O_{40} \perp P_i$
O <sub>41</sub>	перпендикулярности рассматриваемой ОПВ к оси комплекта параллельной плоскости и параллельность ОПВ плоскости комплекта	$O_{41} \perp O_l \vee O_{41} // P_i$
O <sub>42</sub>	параллельности рассматриваемой ОПВ к оси комплекта баз параллельной плоскости	$O_{42} // O_l$
O <sub>43</sub>	параллельности рассматриваемой ОПВ к оси комплекта перпендикулярной плоскости	$O_{43} // O_l$
O <sub>44</sub>	перпендикулярности рассматриваемой ОПВ к оси комплекта параллельной плоскости и перпендикулярности к оси комплекта перпендикулярной плоскости	$O_{44} \perp O_l \vee O_{44} \perp O_n$

Окончание таблицы А.4

1	2	3
$O_{45}$	углового расположения рассматриваемой ОПВ к оси комплекта параллельной плоскости и параллельности плоскости комплекта баз	$O_{45} \angle O_l \vee O_{45} // P_i$
$O_{46}$	углового расположения рассматриваемой ОПВ к оси комплекта параллельной плоскости и углового расположения к плоскости комплекта	$O_{46} \angle O_l \vee O_{46} \angle P_i$
$O_{47}$	углового расположения рассматриваемой ОПВ к оси комплекта параллельной плоскости и углового расположения к оси комплекта перпендикулярной плоскости	$O_{47} \angle O_l \vee O_{47} \angle O_n$
$P_{40}$	перпендикулярности рассматриваемой плоскости к оси комплекта перпендикулярной плоскости комплекта баз	$P_{40} \perp O_n$
$P_{41}$	перпендикулярности рассматриваемой плоскости к оси комплекта баз параллельной плоскости комплекта	$P_{41} \perp O_l$
$P_{42}$	перпендикулярности рассматриваемой плоскости к плоскости комплекта баз и параллельности к оси комплекта параллельной плоскости комплекта	$P_{42} \perp P_i \wedge P_{42} // O_l$
$P_{43}$	перпендикулярности рассматриваемой плоскости к плоскости комплекта и углового расположения к оси комплекта, параллельной плоскости комплекта	$P_{43} \perp P_i \wedge P_{43} \angle O_l$
$P_{44}$	углового расположения рассматриваемой плоскости к оси комплекта, параллельной плоскости комплекта, и параллельности к оси комплекта, перпендикулярной плоскости комплекта	$P_{44} \angle O_l \wedge P_{44} // O_n$
$P_{45}$	углового расположения рассматриваемой плоскости к плоскости комплекта и параллельности к оси комплекта, параллельной плоскости комплекта	$P_{45} \angle P_i \wedge P_{45} // O_l$
$P_{46}$	углового расположения рассматриваемой плоскости к оси комплекта, перпендикулярной плоскости комплекта, и параллельности к оси комплекта, параллельной плоскости комплекта	$P_{46} \angle O_n \wedge P_{46} // O_l$
$P_{47}$	углового расположения рассматриваемой плоскости к плоскости комплекта и углового расположения к оси комплекта, параллельной плоскости комплекта	$P_{47} \angle P_i \wedge P_{47} \angle O_l$
$P_{48}$	углового расположения к оси комплекта, перпендикулярной плоскости комплекта, и углового расположения к оси комплекта, параллельной плоскости комплекта	$P_{48} \angle O_n \wedge P_{48} \angle O_l$

**Приложение Б**  
**Правила назначения компонентов комплекта**  
**технологических баз**

Таблица Б.1 – Состав баз № 1

Пра- вило	Содержание
1	2
O10	Если приоритетным является допуск перпендикулярности оси $O_{10}$ относительно плоскости $P_i$ , а допуск линейного размера относительно $P_{j(k)}$ меньше допуска линейного размера относительно $P_{k(j)}$ , то плоскость $P_i$ назначается тройной однонаправленной (установочной) базой, плоскость $P_{j(k)}$ – двойной однонаправленной (направляющей), плоскость $P_{k(j)}$ – одиночной (опорной). Аналогично определяются компоненты комплекта, если приоритетным является допуск перпендикулярности относительно плоскости $P_j$ либо плоскости $P_k$
O11	Если приоритетными являются допуск параллельности оси $O_{11}$ относительно плоскостей $P_i$ и $P_j$ , а численное значение допуска параллельности оси относительно плоскости $P_{i(j)}$ меньше численного значения допуска параллельности оси относительно плоскости $P_{j(i)}$ , то плоскость $P_{i(j)}$ назначается тройной однонаправленной (установочной) базой, плоскость $P_{j(i)}$ – двойной однонаправленной (направляющей), плоскость $P_k$ – одиночной (опорной). Аналогично определяются компоненты комплекта, если приоритетным является допуск параллельности оси относительно плоскостей $P_i$ и $P_k$ , $P_j$ и $P_k$
O12	Если приоритетными являются допуск параллельности оси $O_{12}$ относительно плоскости $P_i$ и допуск углового расположения относительно $P_{j(k)}$ , а численное значение допуска параллельности оси относительно плоскости $P_i$ меньше численного значения допуска углового расположения оси относительно плоскости $P_{j(k)}$ , то плоскость $P_i$ назначается тройной однонаправленной (установочной) базой, плоскость $P_{j(k)}$ – двойной однонаправленной (направляющей), плоскость $P_{k(j)}$ – одиночной (опорной). В том случае если численное значение допуска углового расположения меньше численного значения допуска параллельности, то в качестве тройной однонаправленной (установочной) базы назначается плоскость $P_{j(k)}$ , двойной однонаправленной (направляющей) – $P_i$ , одиночной (опорной) – $P_{k(j)}$ . Аналогично определяются компоненты комплекта, если приоритетным является допуск параллельности оси относительно плоскостей $P_j$ и $P_k$ и углового расположения относительно $P_{i(k)}$ и $P_{i(j)}$

Окончание таблицы Б1

1	2
П10	Если приоритетными являются допуск перпендикулярности плоскости $\Pi_{10}$ относительно плоскостей $P_i$ и $P_j$ , а численное значение допуска перпендикулярности плоскости относительно плоскости $P_i$ меньше численного значения допуска перпендикулярности относительно плоскости $P_j$ , то плоскость $P_i$ назначается тройной однонаправленной (установочной) базой, плоскость $P_j$ – двойной однонаправленной (направляющей), плоскость $P_k$ – одиночной (опорной). В том случае если численное значение допуска перпендикулярности относительно плоскости $P_i$ больше численного значения допуска перпендикулярности относительно плоскости $P_j$ , то в качестве тройной однонаправленной (установочной) базы назначается плоскость $P_j$ , двойной однонаправленной (направляющей) – $P_i$ , одиночной (опорной) – $P_k$ . Аналогично определяются компоненты комплекта, если приоритетным является допуск параллельности оси относительно плоскостей $P_i$ и $P_k$ , $P_j$ и $P_k$
П11	Если приоритетным является допуск параллельности плоскости $\Pi_{11}$ относительно плоскости $P_i$ , а допуск линейного размера относительно $P_{j(k)}$ меньше допуска линейного размера относительно $P_{k(j)}$ , то плоскость $P_i$ назначается тройной однонаправленной (установочной) базой, плоскость $P_{j(k)}$ – двойной однонаправленной (направляющей), плоскость $P_{k(j)}$ – одиночной (опорной). Аналогично определяются компоненты комплекта, если приоритетным является допуск параллельности относительно плоскости $P_j$ либо плоскости $P_k$
П12	Если приоритетными являются допуск перпендикулярности плоскости $\Pi_{12}$ относительно плоскости $P_i$ и допуск углового расположения относительно $P_{j(k)}$ , а численное значение допуска перпендикулярности относительно плоскости $P_i$ меньше численного значения допуска углового расположения относительно плоскости $P_{j(k)}$ , то плоскость $P_i$ назначается тройной однонаправленной (установочной) базой, плоскость $P_{j(k)}$ – двойной однонаправленной (направляющей), плоскость $P_{k(j)}$ – одиночной (опорной). В том случае если численное значение допуска углового расположения меньше численного значения допуска параллельности, то в качестве тройной однонаправленной (установочной) базы назначается плоскость $P_{j(k)}$ , двойной однонаправленной (направляющей) – $P_i$ , одиночной (опорной) – $P_{k(j)}$ . Аналогично определяются компоненты комплекта, если приоритетным является допуск перпендикулярности плоскости относительно плоскостей $P_j$ и $P_k$ , углового расположения относительно $P_{i(k)}$ и $P_{i(j)}$

Таблица Б.2 – Состав баз № 2

Правило	Содержание
1	2
О20	Если приоритетным является допуск перпендикулярности оси $O_{20}$ относительно плоскости $P_i$ , то плоскость $P_i$ назначается тройной однонаправленной (установочной) базой, плоскость $P_j$ – двойной однонаправленной (направляющей), ось $O_1$ – одиночной (опорной). В частном случае, если плоскость $P_j$ совпадает с осью $O_1$ , то плоскость $P_i$ назначается тройной однонаправленной (установочной) базой, ось $O_1$ назначается двойной разнонаправленной (двойной опорной) базой, а плоскость $P_j$ – одиночной (опорной)

Продолжение таблицы Б.2

1	2
О21	<p>Если приоритетным является допуск перпендикулярности оси <math>O_{21}</math> относительно плоскости <math>P_j</math>, а допуск линейного размера относительно <math>P_i</math> меньше допуска линейного размера относительно <math>O_1</math>, то плоскость <math>P_j</math> назначается тройной однонаправленной (установочной) базой, плоскость <math>P_i</math> – двойной однонаправленной (направляющей), ось <math>O_1</math> – одиночной (опорной). Если допуск линейного размера относительно <math>P_i</math> больше допуска линейного размера относительно <math>O_1</math>, то плоскость <math>P_j</math> назначается тройной однонаправленной (установочной) базой, ось <math>O_1</math> – двойной однонаправленной (направляющей), плоскость <math>P_i</math> – одиночной (опорной) базами. В частном случае, если плоскость <math>P_j</math> совпадает с осью <math>O_1</math>, то ось <math>O_1</math> назначается четверной (двойной направляющей), базой плоскости <math>P_j</math> и <math>P_i</math> назначаются одиночными (опорными) базами</p>
О22	<p>Если приоритетным является допуск параллельности оси <math>O_{22}</math> относительно оси <math>O_1</math>, то ось <math>O_1</math> назначается четверной (двойной направляющей), базой плоскости <math>P_i</math> и <math>P_j</math> назначаются одиночными (опорными) базами. В частности, точка пересечения <math>P_i</math> и <math>O_1</math> может быть тройной разнонаправленной (тройной опорной) базой (в зависимости от возможной реализации), ось <math>O_1</math> – двойной разнонаправленной (двойной опорной), а <math>P_j</math> – одиночной (опорной)</p>
О23	<p>Если приоритетным является допуск перпендикулярности оси <math>O_{23}</math> относительно <math>O_1</math> и параллельности относительно <math>P_j</math>, то плоскость <math>P_j</math> назначается тройной однонаправленной (установочной) базой, ось <math>O_1</math> – двойной однонаправленной (направляющей), плоскость <math>P_i</math> – одиночной (опорной)</p>
О24	<p>Если приоритетными являются допуск параллельности оси <math>O_{24}</math> относительно плоскостей <math>P_i</math> и <math>P_j</math>, а численное значение допуска параллельности оси относительно плоскости <math>P_{i(j)}</math> меньше численного значения допуска параллельности оси относительно плоскости <math>P_{j(i)}</math>, то плоскость <math>P_{i(j)}</math> назначается тройной однонаправленной (установочной) базой, плоскость <math>P_{j(i)}</math> – двойной однонаправленной (направляющей), ось <math>O_1</math> – одиночной (опорной). В частном случае, если плоскость <math>P_j</math> совпадает с осью <math>O_1</math>, то плоскость <math>P_i</math> назначается тройной однонаправленной (установочной) базой, ось <math>O_1</math> назначается двойной разнонаправленной (двойной опорной) базой, а плоскость <math>P_j</math> – одиночной (опорной)</p>
О25	<p>Если приоритетными являются допуск параллельности оси <math>O_{25}</math> относительно плоскости <math>P_j</math> и допуск углового расположения относительно плоскости <math>P_i</math>, а численное значение допуска параллельности оси относительно плоскости <math>P_j</math> больше численного значения допуска углового расположения относительно плоскости <math>P_i</math>, то плоскость <math>P_i</math> назначается тройной однонаправленной (установочной) базой, плоскость <math>P_j</math> – двойной однонаправленной (направляющей), ось <math>O_1</math> – одиночной (опорной). В частном случае, если плоскость <math>P_j</math> совпадает с осью <math>O_1</math>, то плоскость <math>P_i</math> назначается тройной однонаправленной (установочной) базой, ось <math>O_1</math> назначается двойной разнонаправленной (двойной опорной) базой, а плоскость <math>P_j</math> – одиночной (опорной). Если численное значение допуска параллельности оси относительно плоскости <math>P_j</math> меньше численного значения допуска углового расположения относительно плоскости <math>P_i</math>, то плоскость <math>P_j</math> назначается тройной однонаправленной (установочной) базой, плоскость <math>P_i</math> – двойной однонаправленной (направляющей), ось <math>O_1</math> – одиночной (опорной)</p>

Продолжение таблицы Б.2

1	2
О27	Если приоритетными являются допуск параллельности оси $O_{27}$ относительно плоскости $P_j$ и допуск углового расположения относительно оси $O_1$ , то плоскость $P_j$ назначается тройной однонаправленной (установочной) базой, ось $O_1$ – двойной однонаправленной (направляющей), плоскость $P_i$ – одиночной (опорной). В частном случае, если плоскость $P_j$ совпадает с осью $O_1$ , то ось $O_1$ назначается четверной (двойной направляющей) базой, а плоскости $P_j$ и $P_i$ – одиночными (опорными)
О29	Если приоритетными являются допуск параллельности оси $O_{29}$ относительно плоскости $P_i$ и допуск углового расположения относительно плоскости $P_j$ , а численное значение допуска параллельности оси относительно плоскости $P_i$ меньше численного значения допуска углового расположения относительно плоскости $P_j$ , то плоскость $P_i$ назначается тройной однонаправленной (установочной) базой, плоскость $P_j$ – двойной однонаправленной (направляющей), ось $O_1$ – одиночной (опорной). В частном случае, если плоскость $P_j$ совпадает с осью $O_1$ , то $O_1$ назначается двойной разнонаправленной (двойной опорной) базой, а плоскости $P_j$ и $P_i$ одиночной (опорной) и тройной однонаправленной (установочной) соответственно. Если численное значение допуска параллельности оси относительно плоскости $P_i$ больше численного значения допуска углового расположения относительно плоскости $P_j$ , то плоскость $P_j$ назначается тройной однонаправленной (установочной) базой, плоскость $P_i$ – двойной однонаправленной (направляющей), ось $O_1$ – одиночной (опорной)
П20	Если приоритетными являются допуск перпендикулярности плоскости $\Pi_{20}$ относительно плоскостей $P_i$ и $P_j$ , а численное значение допуска перпендикулярности относительно плоскости $P_i$ меньше численного значения допуска перпендикулярности относительно плоскости $P_j$ , то плоскость $P_i$ назначается тройной однонаправленной (установочной) базой, плоскость $P_j$ – двойной однонаправленной (направляющей), ось $O_1$ – одиночной (опорной). В том случае если численное значение допуска перпендикулярности относительно плоскости $P_i$ больше численного значения допуска перпендикулярности относительно плоскости $P_j$ , то в качестве тройной однонаправленной (установочной) базы назначается плоскость $P_j$ , двойной однонаправленной (направляющей) – $P_i$ , одиночной (опорной) – ось $O_1$
П21	Если приоритетным является допуск параллельности плоскости $\Pi_{21}$ относительно плоскости $P_j$ , то плоскость $P_j$ назначается тройной однонаправленной (установочной) базой, плоскость $P_i$ – двойной однонаправленной (направляющей), ось $O_1$ – одиночной (опорной). В частном случае, если плоскость $P_j$ совпадает с осью $O_1$ , то $O_1$ назначается четверной (двойной направляющей) базой, а плоскости $P_j$ и $P_i$ – одиночными (опорными)
П22	Если приоритетным является допуск параллельности плоскости $\Pi_{22}$ относительно плоскости $P_i$ , то плоскость $P_i$ назначается тройной однонаправленной (установочной) базой, плоскость $P_j$ – двойной однонаправленной (направляющей), ось $O_1$ – одиночной (опорной). В частном случае, если плоскость $P_j$ совпадает с осью $O_1$ , то плоскость $P_i$ назначается тройной однонаправленной (установочной) базой, ось $O_1$ назначается двойной разнонаправленной (двойной опорной) базой, а плоскость $P_j$ – одиночной (опорной)
П23	Если приоритетным является допуск перпендикулярности плоскости $\Pi_{23}$ относительно оси $O_1$ , то ось $O_1$ назначается четверной (двойной направляющей) базой, плоскости $P_i$ и $P_j$ назначаются одиночными (опорными) базами

Окончание таблицы Б.2

1	2
П24	<p>Если приоритетным является допуск параллельности плоскости <math>\Pi_{24}</math> относительно <math>O_1</math> и перпендикулярности относительно <math>P_j</math>, то плоскость <math>P_j</math> назначается тройной однонаправленной (установочной) базой, ось <math>O_1</math> – двойной однонаправленной (направляющей), плоскость <math>P_i</math> – одиночной (опорной). В частном случае, если плоскость <math>P_j</math> совпадает с осью <math>O_1</math>, то <math>O_1</math> назначается четверной (двойной направляющей) базой, а плоскости <math>P_i</math> и <math>P_j</math> – одиночными (опорными)</p>
П25	<p>Если приоритетными являются допуск перпендикулярности плоскости <math>\Pi_{25}</math> относительно плоскости <math>P_j</math> и допуск углового расположения относительно плоскости <math>P_i</math>, а численное значение допуска параллельности оси относительно плоскости <math>P_j</math> больше численного значения допуска углового расположения относительно плоскости <math>P_i</math>, то плоскость <math>P_i</math> назначается тройной однонаправленной (установочной) базой, плоскость <math>P_j</math> двойной однонаправленной (направляющей), ось <math>O_1</math> одиночной (опорной). В частном случае, если плоскость <math>P_j</math> совпадает с осью <math>O_1</math>, то плоскость <math>P_i</math> назначается тройной однонаправленной (установочной) базой, ось <math>O_1</math> назначается двойной разнонаправленной (двойной опорной) базой, а плоскость <math>P_j</math> – одиночной (опорной). Если численное значение допуска перпендикулярности относительно плоскости <math>P_j</math> меньше численного значения допуска углового расположения относительно плоскости <math>P_i</math>, то плоскость <math>P_j</math> назначается тройной однонаправленной (установочной) базой, плоскость <math>P_i</math> – двойной однонаправленной (направляющей), ось <math>O_1</math> – одиночной (опорной)</p>
П26	<p>Если приоритетными являются допуск перпендикулярности <math>\Pi_{26}</math> относительно плоскости <math>P_i</math> и допуск углового расположения относительно плоскости <math>P_j</math>, а численное значение допуска перпендикулярности относительно плоскости <math>P_i</math> меньше численного значения допуска углового расположения относительно плоскости <math>P_j</math>, то плоскость <math>P_i</math> назначается тройной однонаправленной (установочной) базой, плоскость <math>P_j</math> – двойной однонаправленной (направляющей), ось <math>O_1</math> – одиночной (опорной). В частном случае, если плоскость <math>P_j</math> совпадает с осью <math>O_1</math>, то <math>O_1</math> назначается двойной разнонаправленной (двойной опорной) базой, а плоскости <math>P_j</math> и <math>P_i</math> – одиночной (опорной) и тройной однонаправленной (установочной) соответственно. Если численное значение допуска перпендикулярности относительно плоскости <math>P_i</math> больше численного значения допуска углового расположения относительно плоскости <math>P_j</math>, то плоскость <math>P_j</math> назначается тройной однонаправленной (установочной) базой, плоскость <math>P_i</math> – двойной однонаправленной (направляющей), ось <math>O_1</math> – одиночной (опорной). В частном случае, если плоскость <math>P_j</math> совпадает с осью <math>O_1</math>, то <math>O_1</math> назначается четверной (двойной направляющей) базой, а плоскости <math>P_j</math> и <math>P_i</math> – одиночными (опорными)</p>
П27	<p>Если приоритетными являются допуск перпендикулярности плоскости <math>\Pi_{27}</math> относительно плоскости <math>P_j</math> и допуск углового расположения относительно оси <math>O_1</math>, а численное значение допуска перпендикулярности относительно плоскости <math>P_j</math> меньше численного значения допуска углового расположения относительно оси <math>O_1</math>, то плоскость <math>P_j</math> назначается тройной однонаправленной (установочной) базой, ось <math>O_1</math> – направляющей, плоскость <math>P_i</math> – одиночной (опорной). В частном случае, если плоскость <math>P_j</math> совпадает с осью <math>O_1</math>, то ось <math>O_1</math> назначается четверной (двойной направляющей) базой, а плоскости <math>P_i</math> и <math>P_j</math> – одиночными (опорными)</p>

Таблица Б.3 – Состав баз № 3

Правило	Содержание
1	2
О30	Если приоритетным является допуск перпендикулярности оси $O_{30}$ относительно плоскости $P_i$ , то плоскость $P_j$ назначается тройной однонаправленной (установочной) базой, одна из осей – двойной разнонаправленной (двойной опорной), вторая – одиночной (опорной)
О31	Если приоритетным является допуск параллельности оси $O_{31}$ относительно оси $O_{l(n)}$ , то ось $O_{l(n)}$ назначается четверной (двойной направляющей) базой, ось $O_{n(l)}$ и плоскость $P_i$ назначаются одиночными (опорными) базами
О32	Если приоритетным является допуск перпендикулярности оси $O_{32}$ относительно плоскости, проходящей через две оси $\{O_1O_n\}$ , то ось, от которой приоритетным является размер до обрабатываемой оси, назначается четверной (двойной направляющей) базой, другая ось и плоскость назначаются одиночными (опорными) базами
О33	Если приоритетными являются допуск параллельности оси $O_{33}$ относительно плоскостей $P_i$ и плоскости проходящей через две оси $\{O_1O_n\}$ , то плоскость $P_i$ назначается тройной однонаправленной (установочной) базой, одна из осей двойной разнонаправленной (двойной опорной), вторая одиночной (опорной)
О34	Если приоритетными являются допуск параллельности оси $O_{34}$ относительно плоскости, проходящей через две оси $\{O_1O_n\}$ , и допуск углового расположения относительно плоскости $P_i$ , то плоскость $P_i$ назначается тройной однонаправленной (установочной) базой, одна из осей – двойной разнонаправленной (двойной опорной), вторая – одиночной (опорной)
О36	Если приоритетными являются допуск параллельности оси $O_{36}$ относительно плоскости $\{O_1O_n\}$ и допуск углового расположения относительно оси $O_{l(n)}$ , то ось $O_{l(n)}$ назначается четверной (двойной направляющей) базой, одна из осей и плоскость $P_i$ – одиночными (опорными)
П30	Если приоритетными являются допуск перпендикулярности плоскости $\Pi_{30}$ относительно плоскости $\{O_1O_n\}$ и $P_i$ и численное значение допуска перпендикулярности относительно $P_i$ меньше численного значения допуска перпендикулярности относительно $\{O_1O_n\}$ , то плоскость $P_i$ назначается тройной однонаправленной (установочной) базой, одна из осей, от которой приоритетным является размер, – двойной разнонаправленной (двойной опорной), вторая – одиночной (опорной). Если численное значение допуска перпендикулярности относительно $P_i$ больше численного значения допуска перпендикулярности относительно $\{O_1O_n\}$ , то плоскость $\{O_1O_n\}$ назначается тройной однонаправленной (установочной) базой, $P_i$ – двойной однонаправленной (направляющей), одна из осей, от которой приоритетным является размер – одиночной (опорной)
П31	Если приоритетным является допуск параллельности плоскости $\Pi_{31}$ относительно плоскости $\{O_1O_n\}$ , то одна из осей назначается четверной (двойной направляющей) базой, вторая ось и плоскость $P_i$ назначаются одиночными (опорными) базами
П32	Если приоритетным является допуск параллельности плоскости $\Pi_{32}$ относительно плоскости $P_i$ , то плоскость $P_i$ назначается тройной однонаправленной (установочной) базой, одна из осей – двойной разнонаправленной (двойной опорной), вторая – одиночной (опорной)

Окончание таблицы Б.3

П33	Если приоритетным является допуск перпендикулярности плоскости $P_{33}$ относительно одной оси, то эта ось назначается четверной (двойной направляющей) базой, вторая ось и плоскость $P_i$ назначаются одиночными (опорными) базами
П34	Если приоритетными являются допуск перпендикулярности плоскости $P_{34}$ относительно плоскости $P_i$ и углового расположения относительно плоскости $\{O_1O_n\}$ и численное значение допуска перпендикулярности относительно $P_i$ меньше численного значения допуска углового расположения относительно $\{O_1O_n\}$ , то плоскость $P_i$ назначается тройной однонаправленной (установочной) базой, одна из осей, от которой приоритетным является размер, – двойной разнонаправленной (двойной опорной), вторая – одиночной (опорной). Если численное значение допуска перпендикулярности относительно $P_i$ больше численного значения допуска углового расположения относительно $\{O_1O_n\}$ , то плоскость $\{O_1O_n\}$ назначается тройной однонаправленной (установочной) базой, $P_i$ – двойной однонаправленной (направляющей), одна из осей, от которой приоритетным является размер – одиночной (опорной)
П35	Если приоритетными являются допуск перпендикулярности плоскости $P_{35}$ относительно плоскости $\{O_1O_n\}$ и углового расположения относительно плоскости $P_i$ $\{O_1O_n\}$ и численное значение допуска углового расположения относительно $P_i$ меньше численного значения допуска перпендикулярности относительно $\{O_1O_n\}$ , то плоскость $P_i$ назначается тройной однонаправленной (установочной) базой, одна из осей, от которой приоритетным является размер, – двойной разнонаправленной (двойной опорной), вторая – одиночной (опорной). Если численное значение допуска углового расположения относительно $P_i$ больше численного значения допуска перпендикулярности относительно $\{O_1O_n\}$ , то плоскость $\{O_1O_n\}$ назначается тройной однонаправленной (установочной) базой, $P_i$ – двойной однонаправленной (направляющей) одна из осей, от которой приоритетным является размер – одиночной (опорной)

Таблица Б.4 – Состав баз № 4

Правило	Содержание
1	2
О40	Если приоритетным является допуск перпендикулярности оси $O_{40}$ относительно плоскости $P_i$ , то плоскость $P_i$ назначается тройной однонаправленной (установочной) базой, ось $O_1$ – двойной однонаправленной (направляющей), $O_n$ – одиночной (опорной). В том случае, если ось $O_1$ лежит в плоскости $P_i$ то ось назначается четверной (двойной направляющей) базой, а другая ось и плоскость – одиночными (опорными)
О41	Если приоритетным является допуск перпендикулярности оси $O_{41}$ относительно оси $O_1$ и параллельности относительно плоскости $P_i$ , то плоскость $P_i$ назначается тройной однонаправленной (установочной) базой, ось $O_1$ – двойной однонаправленной (направляющей), $O_n$ – одиночной (опорной). В том случае, если ось $O_1$ лежит в плоскости $P_i$ , то указанная ось назначается четверной (двойной направляющей) базой, а другая ось и плоскость – одиночными (опорными)

Продолжение таблицы Б.4

1	2
О42	Если приоритетным является допуск параллельности оси $O_{42}$ относительно оси $O_1$ , то ось $O_1$ назначается четверной (двойной направляющей) базой, $O_n$ и $P_i$ – одиночными (опорными). В частности, если плоскость совпадает с $O_n$ , то $O_n$ принимается в качестве двойной разнонаправленной (двойной опорной) базы
О43	Если приоритетным является допуск параллельности оси $O_{43}$ относительно оси $O_n$ , то ось $O_n$ назначается четверной (двойной направляющей) базой, $O_1$ и $P_i$ – одиночными (опорными). В частности, если плоскость совпадает с $O_1$ , то $O_1$ принимается в качестве двойной разнонаправленной (двойной опорной) базы
О44	Если приоритетным является допуск перпендикулярности оси $O_{44}$ относительно осей $O_n$ и $O_1$ , а ось лежит в плоскости и численное значение допуска относительно $O_{n(l)}$ меньше численного значения допуска относительно $O_{l(n)}$ , то ось $O_{n(l)}$ назначается четверной (двойной направляющей) базой, а $O_{l(n)}$ – двойной разнонаправленной (двойной опорной)
О45	Если приоритетными являются допуск параллельности оси $O_{45}$ относительно плоскости $P_i$ и углового расположения относительно оси $O_1$ , то плоскость $P_i$ назначается тройной однонаправленной (установочной) базой, ось $O_1$ – двойной однонаправленной (направляющей), ось $O_n$ – одиночной (опорной). В том случае, если ось $O_1$ лежит в плоскости $P_i$ , то указанная ось назначается четверной (двойной направляющей) базой, а другая ось и плоскость – одиночными (опорными)
П42	Если приоритетными являются допуск перпендикулярности плоскости $\Pi_{42}$ относительно плоскости $P_i$ и параллельности относительно оси $O_1$ , то плоскость $P_i$ назначается тройной однонаправленной (установочной) базой, ось $O_1$ – двойной однонаправленной (направляющей), ось $O_n$ – одиночной (опорной). В том случае, если ось $O_1$ лежит в плоскости $P_i$ , то указанная ось назначается четверной (двойной направляющей) базой, а другая ось и плоскость – одиночными (опорными)
П43	Если приоритетными являются допуск перпендикулярности плоскости $\Pi_{43}$ относительно плоскости $P_i$ и углового расположения относительно оси $O_1$ , то плоскость $P_i$ назначается тройной однонаправленной (установочной) базой, ось $O_1$ – двойной однонаправленной (направляющей), ось $O_n$ – одиночной (опорной). В том случае, если ось $O_1$ лежит в плоскости $P_i$ , то указанная ось назначается четверной (двойной направляющей) базой, а другая ось и плоскость – одиночными (опорными)
П44	Если приоритетными являются допуск параллельности плоскости $\Pi_{44}$ относительно оси $O_n$ и углового расположения относительно оси $O_1$ , а ось лежит в плоскости, и численное значение допуска параллельности плоскости относительно оси $O_n$ меньше численного значения допуска углового расположения относительно оси $O_1$ , то ось $O_n$ назначается четверной (двойной направляющей) базой, ось $O_1$ – одиночной (опорной). Если численное значение допуска параллельности плоскости относительно оси $O_n$ больше численного значения допуска углового расположения относительно оси $O_1$ , то ось $O_1$ назначается четверной (двойной направляющей) базой, ось $O_n$ – одиночной (опорной)

Окончание таблицы Б.4

1	2
П45	<p>Если приоритетными являются допуск углового расположения плоскости <math>\Pi_{45}</math> относительно плоскости <math>P_i</math> и параллельности относительно оси <math>O_1</math>, то плоскость <math>P_i</math> назначается тройной однонаправленной (установочной) базой, ось <math>O_1</math> – двойной однонаправленной (направляющей), ось <math>O_n</math> – одиночной (опорной). В том случае, если ось <math>O_1</math> лежит в плоскости <math>P_i</math>, то указанная ось назначается четверной (двойной направляющей) базой, а другая ось и плоскость – одиночными (опорными)</p>
П46	<p>Если приоритетными являются допуск параллельности плоскости <math>\Pi_{46}</math> относительно оси <math>O_1</math> и углового расположения относительно оси <math>O_n</math>, а ось лежит в плоскости, и численное значение допуска параллельности плоскости относительно оси <math>O_1</math> меньше численного значения допуска углового расположения относительно <math>O_n</math>, то ось <math>O_1</math> назначается четверной (двойной направляющей) базой, ось <math>O_n</math> – одиночной (опорной). Если численное значение допуска параллельности плоскости относительно оси <math>O_1</math> больше численного значения допуска углового расположения относительно <math>O_n</math>, то ось <math>O_n</math> назначается четверной (двойной направляющей) базой, ось <math>O_1</math> – двойной разнонаправленной (двойной опорной)</p>

## Приложение В

### Обозначения установочных, установочно-зажимных и зажимных элементов

Таблица В.1 – Разные обозначения

№ п/п	Наименование	Обозначение на схеме установки		
		сбоку	сверху	снизу
1	Опора подвижная			
2	Опора регулируемая			
3	Люнет подвижный		—	—
4	Люнет неподвижный		—	—
5	Патрон поводковый		—	—
6	Зажим одиночный			
7	Зажим двойной			

Таблица В.2 – Таблица соответствия установочных элементов  
технологическим базам

База	Наименование	Код	Обозначение на схеме установки		
			сбоку	сверху	снизу
1	2	3	4	5	6
<i>Устано- вочная</i>	Плоская поверхность корпуса приспособлений	Тр 1.1.		—	—
	Две опорные пластины	Тр 1.2.			
	Опоры точечные неподвижные с плоской поверхностью	Тр 1.3.			
	Опоры точечные неподвижные со сферической поверхностью	Тр 1.4.			
	Опоры точечные неподвижные с рифленой поверхностью	Тр 1.5.			
	Опоры плавающие с плоской поверхностью	Тр 1.6.			
	Опоры плавающие со сферической поверхностью	Тр 1.7.			

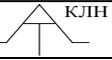
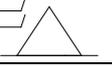
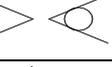
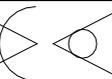
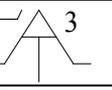
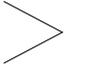
Продолжение таблицы В.2

1	2	3	4	5	6
	Опоры плавающие с рифленой поверхностью	Тр 1.8.			
	Опорное кольцо	Тр 1.9.		—	—
	Пластина и точечная опора	Тр 1.10.	—	—	—
	Магнитная плита	Тр 1.11.		—	—
<i>Направляющая</i>	Плоская поверхность корпуса приспособлений	Тр 2.1.		—	—
	Пластина опорная	Тр 2.2.			
	Опоры точечные неподвижные с плоской поверхностью	Тр 2.3.			
	Опоры точечные неподвижные со сферической поверхностью	Тр 2.4.			
	Опоры точечные неподвижные с рифленой поверхностью	Тр 2.5.			
	Опоры плавающие с плоской поверхностью	Тр 2.6.			
	Опоры плавающие со сферической поверхностью	Тр 2.7.			
	Опоры плавающие с рифленой поверхностью	Тр 2.8.			
	Два цилиндрических пальца	Тр 2.9.	—	—	—
	Зажим самоцентрирующийся	Тр 2.10.	—	—	—
<i>Опорная</i>	Опора точечная неподвижная с плоской поверхностью	Тр 3.1.			
	Опора точечная неподвижная со сферической поверхностью	Тр 3.2.			
	Опора точечная неподвижная с рифленой поверхностью	Тр 3.3.			
	Опора плавающая с плоской поверхностью	Тр 3.4.			
	Опора плавающая со сферической поверхностью	Тр 3.5.			
	Опора плавающая с рифленой поверхностью	Тр 3.6.			
	Палец ромбический	Тр 3.7.			

Продолжение таблицы В.2

1	2	3	4	5	6
	Палец цилиндрический	Тр 3.8.		—	—
	Зажим самоцентрирующийся	Тр 3.9.	—	—	—
	Опора призматическая подводя- мая	Тр 3.10.		—	—
<i>Двойная опорная</i>	Призма	Тр 4.1.		—	—
	Палец цилиндрический	Тр 4.2.		—	—
	Палец конический плавающий	Тр 4.3.		—	—
	Втулка	Тр 4.4.		—	—
	Полувтулка	Тр 4.5.		—	—
	Двухкулачковый патрон	Тр 4.6.		—	—
	Трехкулачковый патрон	Тр 4.7.		—	—
	Четырехкулачковый патрон	Тр 4.8.		—	—
	Втулка разрезная	Тр 4.9.		—	—
	Оправка цанговая	Тр 4.10.		—	—
	Оправка кулачковая	Тр 4.11.		—	—
	Оправка клиновья	Тр 4.12.		—	—
	Оправка клиноплунжерная	Тр 4.13.		—	—
	Оправка с гофрированными эле- ментами	Тр 4.14.		—	—
	Оправка с тарельчатыми пружи- нами	Тр 4.15.		—	—
	Оправка с витой пружиной	Тр 4.16.		—	—
	Оправка шлицевая	Тр 4.17.		—	—
	Оправка резьбовая	Тр 4.18.		—	—
<i>Двойная направ- ляющая</i>	Длинная призма	Тр 5.1.		—	—
	Оправка цилиндрическая	Тр 5.2.		—	—
	Оправка коническая	Тр 5.3.		—	—
	Оправка цанговая	Тр 5.4.		—	—

Окончание таблицы В.2

1	2	3	4	5	6
	Втулка	Тр 5.5		—	—
	Оправка клиновья	Тр 5.6		—	—
	Оправка клиноплунжерная	Тр 5.7.		—	—
	Оправка с гофрированными элементами	Тр 5.8.		—	—
	Оправка с тарельчатыми пружинами	Тр 5.9.		—	—
	Двойная призма	Тр 5.10.		—	—
	Оправка с витой пружиной	Тр 5.11.		—	—
	Оправка шлицевая	Тр 5.12.		—	—
	Оправка резьбовая	Тр 5.13.		—	—
	Центры: неподвижный и вращающийся	Тр 5.14.		—	—
	Центры: рифленый и вращающийся	Тр 5.15.		—	—
	Центры: плавающий и вращающийся	Тр 5.16.		—	—
	Трехкулачковый патрон и вращающийся центр	Тр 5.17.	—	—	—
<i>Тройная опорная</i>	Трехкулачковый патрон с призматическими губками	Тр 6.1.		—	—
	Центр неподвижный	Тр 6.2.		—	—

## Приложение Г

Таблица Г.1 – Сокращения вариантов

База	Код	Условия отбора																				
		Тип производства					Габариты и масса обрабатываемой детали					Показатели качества базы			Базирование		Характер базы		Обработка			
		е	МС	С	КС	М	М	С	К	ОК	Ra50 IT 16-14	Ra 6.3 IT 13-8	Ra 1.25 IT 6-7	По наруж. пов.	По внутр. пов.	Яв- ная	Скры- тая	От- делка	Чи- сто- вая	Пред- ва- рит.		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21		
<i>Устано- вочная</i>	<i>Тр 1.1.</i>	x	x	x			x	x					x	x		x		x	x	x		
	<i>Тр 1.2.</i>	x	x	x	x	x		x	x	x		x	x	x		x		x	x	x		
	<i>Тр 1.3.</i>	x	x	x	x	x			x	x	x	x	x	x		x			x	x		
	<i>Тр 1.4.</i>	x	x	x	x	x			x	x	x	x	x	x		x		x				
	<i>Тр 1.5.</i>	x	x	x	x	x			x	x	x	x			x		x			x		
	<i>Тр 1.6.</i>	x	x	x	x	x				x	x	x	x	x		x			x	x		
	<i>Тр 1.7.</i>	x	x	x	x	x				x	x	x	x	x		x		x				
	<i>Тр 1.8.</i>	x	x	x	x	x				x	x	x		x		x				x		
	<i>Тр 1.9.</i>	x	x	x	x	x			x	x	x		x	x	x		x		x	x		
	<i>Тр 1.10.</i>	x	x	x	x	x			x	x	x		x	x	x		x		x	x		
	<i>Тр 1.11.</i>	x	x	x	x	x		x	x	x	x		x	x	x		x		x	x		
<i>Направляющая</i>	<i>Тр 2.1.</i>	x	x	x			x	x					x	x		x		x	x	x		
	<i>Тр 2.2.</i>	x	x	x	x	x			x	x	x		x	x	x		x		x	x		
	<i>Тр 2.3.</i>	x	x	x	x	x			x	x	x	x	x	x		x	x		x	x		
	<i>Тр 2.4.</i>	x	x	x	x	x			x	x	x	x	x	x		x	x	x				
	<i>Тр 2.5.</i>	x	x	x	x	x			x	x	x	x			x		x	x		x		
	<i>Тр 2.6.</i>	x	x	x	x	x				x	x	x	x	x		x			x	x		
	<i>Тр 2.7.</i>	x	x	x	x	x				x	x	x	x	x		x		x				
	<i>Тр 2.8.</i>	x	x	x	x	x				x	x	x		x		x				x		
	<i>Тр 2.9.</i>	x	x	x	x	x		x	x	x	x		x	x	x		x		x	x		
	<i>Тр 2.10.</i>	x	x	x	x	x			x	x	x	x	x	x	x	x		x	x	x		
<i>Опорная</i>	<i>Тр 3.1.</i>	x	x	x	x	x			x	x	x	x	x		x		x	x		x		
	<i>Тр 3.2.</i>	x	x	x	x	x			x	x	x	x			x		x	x	x			
	<i>Тр 3.3.</i>	x	x	x	x	x			x	x	x	x			x		x	x		x		
	<i>Тр 3.4.</i>	x	x	x	x	x			x	x	x	x			x		x		x	x		
	<i>Тр 3.5.</i>	x	x	x	x	x			x	x	x	x			x		x		x			
	<i>Тр 3.6.</i>	x	x	x	x	x			x	x	x	x			x		x			x		
	<i>Тр 3.7.</i>	x	x	x	x	x		x	x	x	x		x	x		x		x	x			
	<i>Тр 3.8.</i>	x	x	x	x	x		x	x	x	x		x	x	x	x		x	x	x		
	<i>Тр 3.9.</i>	x	x	x	x	x			x	x	x	x			x			x	x	x		
	<i>Тр 3.10.</i>	x	x	x	x	x		x	x	x	x		x	x	x			x	x	x		

Окончание таблицы

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	
<i>Двойная опорная</i>	<i>Тр 4.1.</i>	x	x	x	x	x	x	x	x		x	x	x	x			x	x	x	x	
	<i>Тр 4.2.</i>	x	x	x	x	x	x	x	x	x		x	x		x		x	x	x	x	
	<i>Тр 4.3.</i>	x	x	x	x	x	x	x	x		x	x	x		x		x	x	x	x	
	<i>Тр 4.4.</i>	x	x	x	x	x	x	x	x	x		x	x	x			x	x	x	x	
	<i>Тр 4.5.</i>	x	x	x	x	x	x	x	x	x		x	x	x			x	x	x	x	
	<i>Тр 4.6.</i>				x	x	x	x	x	x	x	x	x	x				x	x	x	x
	<i>Тр 4.7.</i>	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x				x	x	x	x
	<i>Тр 4.8.</i>	x	x	x				x	x	x	x	x	x	x				x	x	x	x
	<i>Тр 4.9.</i>	x	x	x	x	x	x	x	x	x			x	x	x			x	x	x	x
	<i>Тр 4.10.</i>				x	x	x	x	x	x			x	x		x		x	x	x	x
	<i>Тр 4.11.</i>				x	x	x		x	x		x	x	x		x		x	x	x	x
	<i>Тр 4.12.</i>				x	x	x		x	x		x	x	x		x		x	x	x	x
	<i>Тр 4.13.</i>				x	x	x		x	x		x	x	x		x		x	x	x	x
	<i>Тр 4.14.</i>				x	x	x		x	x			x	x		x		x	x	x	x
	<i>Тр 4.15.</i>				x	x	x		x	x			x	x		x		x	x	x	x
	<i>Тр 4.16.</i>				x	x	x		x	x			x	x		x		x	x	x	x
	<i>Тр 4.17.</i>				x	x	x		x	x			x	x		x		x	x	x	x
	<i>Тр 4.18.</i>				x	x	x		x	x			x	x		x		x	x	x	x
<i>Двойная направляющая</i>	<i>Тр 5.1.</i>				x	x		x	x	x	x		x	x			x	x	x	x	
	<i>Тр 5.2.</i>				x	x	x		x	x	x		x	x		x		x	x	x	x
	<i>Тр 5.3.</i>	x	x		x			x	x	x			x	x		x		x	x	x	
	<i>Тр 5.4.</i>				x	x	x		x	x			x	x		x		x	x	x	x
	<i>Тр 5.5.</i>					x	x		x	x			x	x	x			x	x		
	<i>Тр 5.6.</i>				x	x	x		x	x			x	x		x		x	x	x	
	<i>Тр 5.7.</i>				x	x	x		x	x			x	x		x		x	x	x	
	<i>Тр 5.8.</i>				x	x	x		x	x			x	x		x		x	x	x	
	<i>Тр 5.9.</i>				x	x	x		x	x			x	x		x		x	x	x	
	<i>Тр 5.10.</i>				x	x	x		x	x	x	x	x	x	x			x	x	x	x
	<i>Тр 5.11.</i>	x	x		x	x	x		x	x	x	x	x	x		x		x	x	x	
	<i>Тр 5.12.</i>				x	x	x		x	x			x	x		x		x	x	x	x
	<i>Тр 5.13.</i>				x	x	x		x	x			x	x		x		x	x	x	x
	<i>Тр 5.14.</i>	x	x		x	x	x	l/d>2	l/d>2	l/d>2	l/d>2	x	x	x	x	x		x	x	x	x
	<i>Тр 5.15.</i>	x	x		x	x	x	l/d>2	l/d>2	l/d>2	l/d>2	x	x	x	x	x		x	x	x	x
	<i>Тр 5.16.</i>	x	x		x	x	x	l/d>2	l/d>2	l/d>2	l/d>2	x	x	x	x	x		x	x	x	x
	<i>Тр 5.17.</i>	x	x		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x		x	x	x	x
<i>Тройная опорная</i>	<i>Тр 6.1.</i>	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x		x	x	x	x	
	<i>Тр 6.2.</i>	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x		x	x	x	x	

Примечание. Тр 5.14., Тр 5.15., Тр 5.16., Тр 5.17. применяются для деталей класса «вал».

Научное издание

Беляков Николай Владимирович  
Попок Николай Николаевич

**ОСНОВЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО  
ПРОЕКТНОГО БАЗИРОВАНИЯ В  
СУБТРАКТИВНОМ И АДДИТИВНОМ  
МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ ПРОИЗВОДСТВАХ**

**МОНОГРАФИЯ**

Редактор *Р.А. Никифорова*  
Корректор *А.В. Пухальская*  
Компьютерная верстка *Н.В. Беляков*

---

Подписано к печати 10.11.2023. Формат 60x90<sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Усл. печ. листов 11.4.  
Уч.-изд. листов 13.9. Тираж 55 экз. Заказ № 282.

Учреждение образования «Витебский государственный  
технологический университет»  
210038, г. Витебск, Московский пр., 72.  
Отпечатано на ризографе учреждения образования  
«Витебский государственный технологический университет»  
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,  
распространителя печатных изданий № 1/172 от 12 февраля 2014г.  
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,  
распространителя печатных изданий №3/1497 от 30 мая 2017г.