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

Витебский государственный технологический университет

НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИИ МАШИНОСТРОЕНИЯ

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

В двух частях

Часть 1

Рекомендовано Учебно-методическим объединением по образованию в области автоматизации технологических процессов, производств и управления в качестве учебного пособия для магистрантов высших учебных заведений, обучающихся по направлениям: «Автоматизация технологических процессов и производств», «Технология, оборудование и автоматизация машиностроительных производств», «Конструкторско-технологическое обеспечение автоматизированных машиностроительных производств»

Витебск
2021

УДК 621(075.8)
ББК 34.05
Н34

Авторы:

Н. В. Беляков, В. А. Горохов,
Ю. Е. Махаринский, В. И. Ольшанский

Рецензенты:

академик НАН Беларуси, д.т.н., проф. Клубович В.В.;

профессор кафедры технологии машиностроения
Белорусского национального технического университета,
д.т.н., проф. Каштальян И.А.

Рекомендовано к изданию редакционно-издательским советом
УО «ВГТУ», протокол № 6 от 26.02.2021.

Н34 Научные основы технологии машиностроения : учебное пособие. В 2 ч. Ч. 1 / Н. В. Беляков [и др.]. – Витебск : УО «ВГТУ», 2021. – 309 с.

ISBN 978-985-481-676-0 (Ч.1)
ISBN 978-985-481-675-3

Приводится описание этапов жизненного цикла изделий машиностроения, их функционального назначения. Освещены аспекты качества промышленной продукции. Изложены основы технологического обеспечения точности изделий машиностроения, качества поверхностного слоя деталей машин, а также повышения эксплуатационных свойств деталей машин и соединений. Описаны элементы теории технологической наследственности в машиностроении и процессов самоорганизации в технологических системах. Описываются методы оценки эффективности технологических процессов изготовления деталей машин. Представлены методы и автоматизированные системы научных исследований в технологии машиностроения. Приведены научные основы совершенствования и создания новых технологических методов обработки деталей машин.

Издание предназначено для студентов второй ступени высшего образования в области машиностроения и может быть полезным инженерно-техническим и научным работникам предприятий. Может использоваться также в системе повышения квалификации и переподготовки кадров машиностроительного профиля.

УДК 621(075.8)
ББК 34.05

ISBN 978-985-481-676-0 (Ч.1)
ISBN 978-985-481-675-3

© УО «ВГТУ», 2021

Витебский государственный технологический университет

СОДЕРЖАНИЕ

Введение..... 5
1 Жизненный цикл изделий машиностроения и их функциональное назначение..... 6
1.1 Функциональное назначение изделий машиностроения..... 6
1.2 Основы классификации объектов производства..... 9
1.3 Жизненный цикл изделия.....17
1.4 Компоненты технологического процесса механической обработки..... 18
1.5 Вопросы для самоконтроля 24
2 Качество промышленной продукции..... 26
2.1 Петля и система качества.....26
2.2 Уровни и критерии качества.....27
2.2.1 Понятие уровня качества.....27
2.2.2 Понятие критерия качества.....28
2.2.3 Критерии производительности и точности..... 31
2.2.4 Критерии универсальности и гибкости.....33
2.2.5 Критерии надежности.....35
2.2.6 Критерий сложности устройства.....38
2.2.7 Экономические критерии.....40
2.2.8 Эргономический критерий.....44
2.2.9 Методы определения показателей качества..... 45
2.3 Характеристики качества деталей машин.....49
2.3.1 Эксплуатационные свойства деталей.....49
2.3.2 Свойства материалов.....53
2.3.3 Размеры деталей и их точность.....57
2.3.4 Параметры качества поверхностного слоя деталей..... 63
2.4 Вопросы для самоконтроля.....71
3 Технологическое обеспечение точности изделий машиностроения 74
3.1 Современное понятие о точности в машиностроении..... 74
3.2 Базирование.....76
3.2.1 Подходы к теории базирования.....76
3.2.2 Реальное базирование.....81
3.2.3 Конструкторские и технологические проектные базы. Комплект баз ориентации.....85
3.2.4 Понятие теоретических схем базирования и установки. Настроечная база..... 96
3.3 Размерная настройка.....111
3.4 Размерные цепи при сборке и механической обработке..... 118
3.5 Синтез маршрута обработки заготовки..... 131
3.5.1 Структура исходных данных.....131

Витебский государственный технологический университет

3.5.2 Определение порядка обработки и смены баз..... 143
3.5.3 Синтез теоретических схем базирования..... 161
3.5.4 Синтез теоретических схем установки.....169
3.6 Размерный анализ технологического процесса..... 173
3.6.1 Определение припусков и допусков на технологические размеры 173
3.6.2 Формирование размерных схем технологического процесса…… 181
3.6.3 Построение исходного и производного графов, формирование уравнений размерных цепей. 182
3.6.4 Расчет технологических размеров и размеров заготовки..... 186
3.7 Жёсткость машин и технологических систем механической обработки..... 187
3.8 Погрешности сборки и механической обработки..... 194
3.9 Погрешности, не зависящие от режима резания..... 199
3.10 Погрешности, зависящие от режима резания.....216
3.11 Прочие погрешности при механической обработке..... 219
3.12 Обеспечение точности обработки.....223
3.12.1 Характеристики точности и стабильности технологического перехода 223
3.12.2 Статистическое регулирование точности обработки 226
3.12.3 Автоматическое управление точностью обработки по выходным данным 229
3.12.4 Автоматическое управление точностью обработки по рассогласованию 234
3.13 Обеспечение точностных характеристик при формировании соединений.....237
3.14 Вопросы для самоконтроля.....243
4 Технологическое обеспечение качества поверхностного слоя деталей машин.....250
4.1 Механизмы формирования показателей качества поверхностей деталей машин 250
4.2 Влияние способов и условий обработки на шероховатость поверхности 252
4.3 Влияние способов и условий обработки на состояние подповерхностного слоя материала..... 259
4.4 Управление качеством поверхности при шлифовании 263
4.5 Влияние вибраций на процесс и результаты обработки 272
4.5.1 Источники вибраций при лезвийной обработке резанием и шлифовании 272
4.5.2 Борьба с вибрациями при обработке на станках 276
4.5.3 Использование вибраций при обработке на станках 287
Список использованных источников..... 299

Витебский государственный технологический университет

ВВЕДЕНИЕ

Современный научный этап развития технологии машиностроения заключается в объединении технологий проектирования, изготовления и эксплуатации машин, а также в разработке научных основ создания новых методов обработки, позволяющих обеспечить необходимые эксплуатационные свойства деталей машин. Технология машиностроения как наука призвана разработать теорию обеспечения качества изделий при наименьшей себестоимости их изготовления.

Цель учебного пособия – формирование системы научных знаний о современных методах технологического обеспечения эксплуатационных свойств изделий машиностроения, необходимых для решения теоретических и практических задач повышения эффективности производства и качества продукции.

Основной задачей пособия является помощь в овладении знаниями и умениями использования взаимосвязей эксплуатационных свойств изделий с показателями качества деталей машин, а также принятия научно обоснованных решений о выборе, создании и совершенствовании эффективных технологических методов и процессов изготовления, упрочнения и восстановления деталей и сборки машин в условиях конкретного производства.

В учебном пособии приводятся сведения о: влиянии различных факторов на эксплуатационные свойства деталей машин; механизмах формирования параметров точности размеров и допусков взаимного расположения, а также качества поверхностей деталей машин при различных методах их обработки; современных методах научных исследований в технологии машиностроения; основах совершенствования и создания новых технологических методов обработки деталей машин и повышения качества деталей; тенденциях развития теории базирования и наследования погрешности обработки; процессах самоорганизации в машиностроительных системах.

Читатель пособия может научиться: производить оценку необходимой и достижимой в данных условиях точности обработки деталей машин; выбирать требования к характеристикам качества поверхностей деталей машин с учетом условий их эксплуатации и технических условий, а также технологические методы обеспечения этих требований в производстве; выполнять теоретические и экспериментальные исследования в области машиностроения, производить обработку и анализ результатов; оценивать эффективность технологических процессов изготовления деталей машин, а также определять пути повышения производительности и снижения себестоимости.

Витебский государственный технологический университет

1 ЖИЗНЕННЫЙ ЦИКЛ ИЗДЕЛИЙ МАШИНОСТРОЕНИЯ И ИХ ФУНКЦИОНАЛЬНОЕ НАЗНАЧЕНИЕ

1.1 Функциональное назначение изделий машиностроения

Изделием в машиностроении является предмет производства, подлежащий изготовлению. Машиностроительным изделием может быть как машина в целом, так и сборочная единица, деталь или заготовка [1].

Деталь – неразъемное изделие (образованное без сборочных соединений), чаще всего из однородного материала, имеющее определенную геометрическую форму и выполняющее хотя бы одну функцию по обеспечению работы других функциональных элементов или всей машины.

Заготовка – это изделие, из которого изменением формы, размеров, точности и качества поверхностных слоёв (иногда и физико-механических свойств материала) изготавливают деталь.

Функциональными элементами машины являются детали и сборочные единицы.

Функционально-сборочная единица – множество связанных деталей ((узлов) различных уровней сложности), в совокупности выполняющих хотя бы одну функцию по обеспечению работы других функциональных элементов или всей машины.

Машиной называется устройство, выполняющее определённые функции (часто механические движения) на основе преобразования энергии, в целях замены или облегчения физического и умственного труда человека, повышения производительности и качества продукции.

Основные (или *исполнительные*) *элементы машины* – элементы, которые непосредственно взаимодействуют с объектами от исходного состояния до конечного результата и функция которых в совокупности совпадает с функцией машины. Аналогично можно выделить основные элементы любой функциональной единицы машины.

Кроме основных, в машине обычно имеются *вспомогательные элементы*. К ним относят: *несущие* элементы, элементы *связи*; элементы *передачи;* элементы *управления*; *двигатели* и *движители*; элементы *гашения скоростей* и *ускорений*. Несущие элементы обеспечивают определенность взаиморасположения и (или) относительного движения других элементов машины. Элементы связи обеспечивают определенную степень свободы (от нуля до пяти) движения одних элементов по отношению к другим. Элементы передачи передают на расстояние механическую энергию движения и (или) статические силы и моменты с одновременным их преобразованием. Элементы управления осуществляют

Витебский государственный технологический университет

сбор, хранение и переработку информации для выработки управляющего воздействия и передачу его исполнительным элементам. Двигатели преобразуют энергию заданного вида (обычно электрическую) в механическую.

Движители преобразуют работу двигателя или другого источника энергии в работу на преодоление сил сопротивления движению машины. Элементы гашения скоростей и ускорений уменьшают скорость движения или амплитуду колебаний. Иногда перечисленные элементы трудно выделить, так как часто многие узлы и детали выполняют одновременно несколько функций.

На рисунке 1.1 показана сборочная единица, главной полезной функцией которой является передача и изменение направления (на 90°) движения и крутящего момента от вала *9* к шестерне *21*. Эти детали являются исходными компонентами данного устройства.

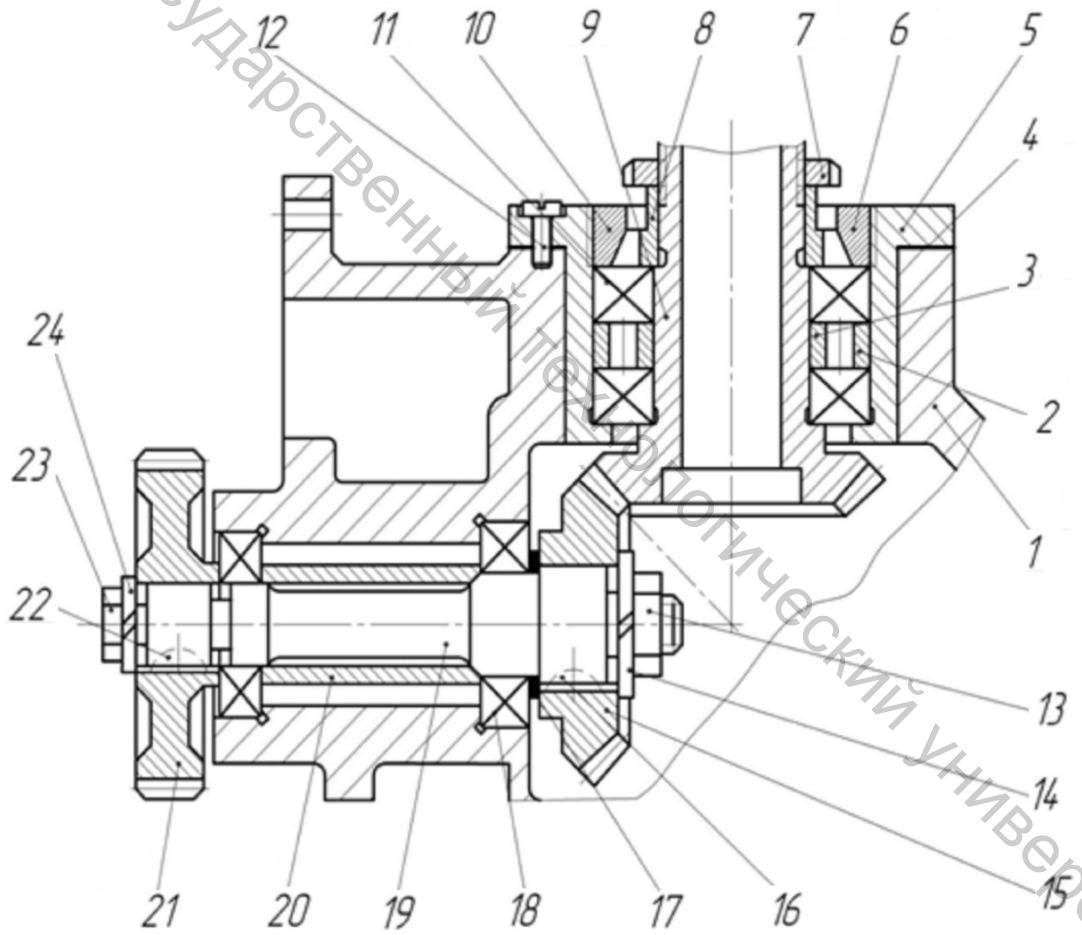


Рисунок 1.1 – Сборочная единица:
1 – корпус; 2 – втулка; 3 – втулка; 4 – прокладка; 5 – обойма; 6 – кольцо; 7 – шайба стопорная; 8 – гайка; 9 – вал-шестерня; 10 – втулка; 11 – подшипник (2 шт.); 12 – винт (6 шт.); 13 – гайка; 14 – шайба пружинная; 15 – колесо зубчатое; 16 – шпонка; 17 – прокладка; 18 – подшипник (2 шт.); 19 – вал; 20 – втулка; 21 – колесо зубчатое; 22 – шпонка; 23 – болт; 24 – шайба пружинная

Витебский государственный технологический университет

Корпус *1* является несущим компонентом этой системы. А подшипники *11*, *18*, распорные втулки *2*, *3*, *20*, резьбовое кольцо *6*, гайка *8* и болт *23* являются компонентами связи. Компонентами передачи этой системы являются конические шестерни *15*.

Множество деталей становится функциональной единицей и (или) машиной, когда между ними, путем осуществления *различных соединений*, устанавливаются размерные связи. Классификация соединений деталей в машиностроении приведена на рисунке 1.2.

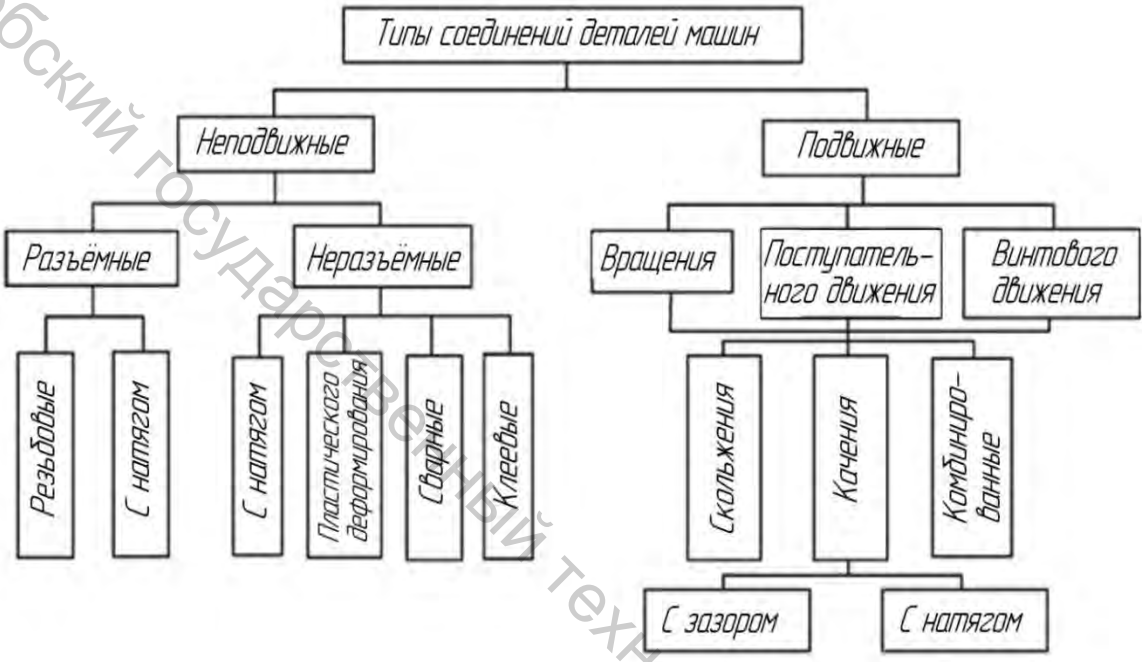


Рисунок 1.2 – Классификация соединений деталей машин

Компонентами деталей являются отдельные поверхности или группы поверхностей, выполняющие хотя бы одну функцию. По выполняемым функциям компоненты детали делятся на: *основные сборочные базы*, *вспомогательные сборочные базы*, *рабочие поверхности*, *крепежные поверхности*, *поверхности коммуникации* (*для организации потоков, объемов и зазоров*), *объединяющие поверхности*, *технологические поверхности* [1].

Основные сборочные базы выполняют функцию ориентации детали в сборочной единице. Так, шейки вала *19* (см. рис. 1.1), которые опираются на подшипники *18*, являются основными сборочными базами.

Вспомогательные сборочные базы выполняют функцию ориентации деталей, которые присоединяются к рассматриваемой. Так, шейки вала *19* (совместно со шпоночными пазами, имеющимися на них), на которые монтируются шестерни *15* и *21* совместно со шпонками, являются вспомогательными сборочными базами.

Рабочими компонентами детали передается движение (и соответственно сила) через соответствующие компоненты другой детали. В де-

Витебский государственный технологический университет

талях рассматриваемой сборочной единицы рабочими компонентами являются зубчатые венцы шестерен *21*, *15* и вал-шестерни *9*.

Крепежными обычно являются резьбовые отверстия или наружные резьбы, например, на болтах. К ним относят также отверстия под болт или винт (см. рис. 1.1 отверстия под винты *12*). Через *поверхность коммуникации* проходят, не соприкасаясь, другие детали сборочной единицы. Например, через отверстие корпуса *1* проходит, не соприкасаясь, втулка *20*. Поверхности коммуникации (отверстия и канавки) служат также для подвода смазки, охлаждения и т.д.

Функцией *объединяющих поверхностей* является объединение детали в единое целое. *Технологические поверхности* (фаски и канавки) служат для облегчения взаимной ориентации или сопряжения соединяемых деталей при сборке или для выхода инструмента при отделочной обработке.

В технической системе иногда трудно выделить функциональные компоненты. *Нередко один компонент выполняет несколько функций*. В таких случаях можно в зависимости от обстоятельств присваивать ему все его функции или одну, важнейшую.

1.2 Основы классификации объектов производства

Классификацию элементов машины удобнее начинать с классификации форм неделимых элементов – типовых поверхностей деталей, так как мощность их множества существенно ниже мощности множества самих деталей, а тем более множества сборочных единиц. Цель классификации – свести многообразие форм поверхностей к сочетанию ограниченного числа элементов и признаков. Наиболее экономной является система классификации с иерархическим подчинением признаков, когда каждый признак нижней ступени классификации конкретизирует признак высшей ступени. При этом действует принцип, согласно которому все члены классификационного деления на каждой его ступени взаимно исключают друг друга. Задача классификации существенно упростится, если в основу систематизации положить закономерности формообразования поверхностей [2–6].

Большинство поверхностей в деталях машин относится к числу *кинематических*, т.е. они могут быть получены перемещением некоторой плоской кривой (*образующей*) по другой, неподвижной в пространстве (*направляющей*). При этом направляющая и образующая имеют одну общую точку, в которой угол между касательной к образующей и плоскостью, содержащей направляющую, чаще всего является постоянным. В общем случае размеры и форма образующей в процессе движения могут изменяться.

Витебский государственный технологический университет

Самая высокая ступень классификации поверхностей – *класс*, признаком которого является закон движения образующей (т.е. вид направляющей). По этому признаку все поверхности делятся на пять классов: плоские поверхности, направляющей которых является прямая; поверхности вращения, направляющей которых является окружность; винтовые поверхности, направляющей которых является винтовая линия; зубчатые поверхности, направляющими которых являются периодические кривые разных типов; фасонные поверхности, направляющими которых являются алгебраические или трансцендентные кривые.

Подкласс отражает совокупность форм образующих, обладающих некоторым общим признаком, а *группа* уточняет форму образующей. Следующей ступенью классификации является *вид* поверхности, который определяет форму границ поверхности по длине или, другими словами, свободу выхода инструмента. На этой ступени поверхности делятся на открытые, полуоткрытые и закрытые. В зависимости от расположения поверхности относительно материала детали на последней ступени классификации выделяются два *типа* поверхностей: наружные и внутренние.

Схема классификационной иерархии поверхностей деталей машин показана на рисунке 1.3.

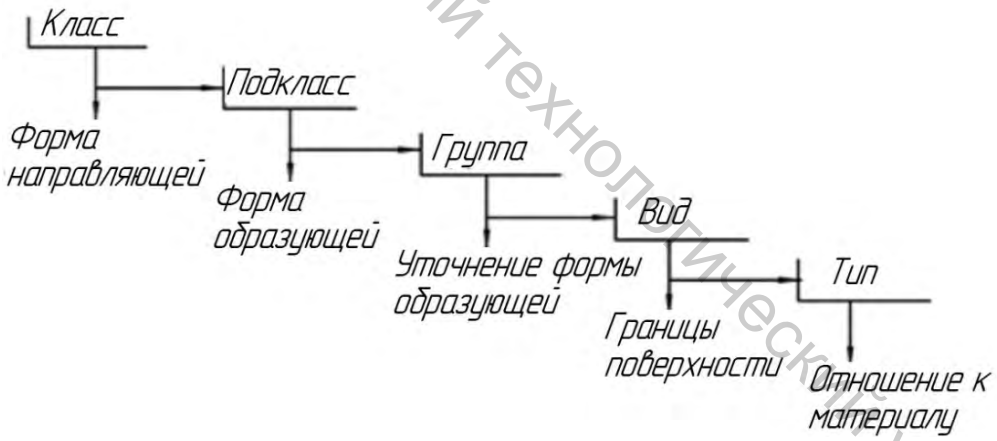


Рисунок 1.3 – Классификация типовых поверхностей деталей машин по форме

Подробные классификационные схемы форм поверхностей деталей машин приведены на рисунках 1.4–1.8. Эти схемы показывают, что не все группы поверхностей имеют полный набор видов и не у всех видов поверхностей могут быть реализованы оба типа. Например, окна в классе плоских поверхностей могут быть только закрытыми и внутренними, а направляющие обычно бывают только открытыми. Канавки поверхностей вращения могут быть только полуоткрытыми, а резьбы не могут быть закрытыми.

Витебский государственный технологический университет

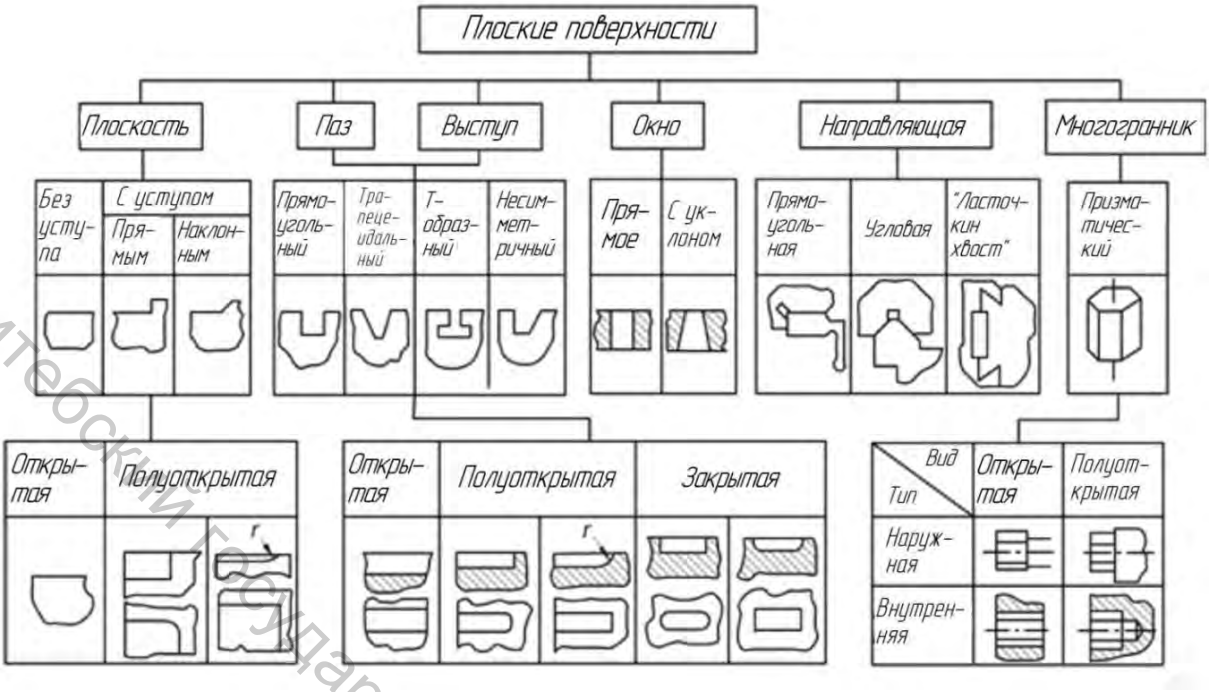


Рисунок 1.4 – Классификационная схема плоских поверхностей

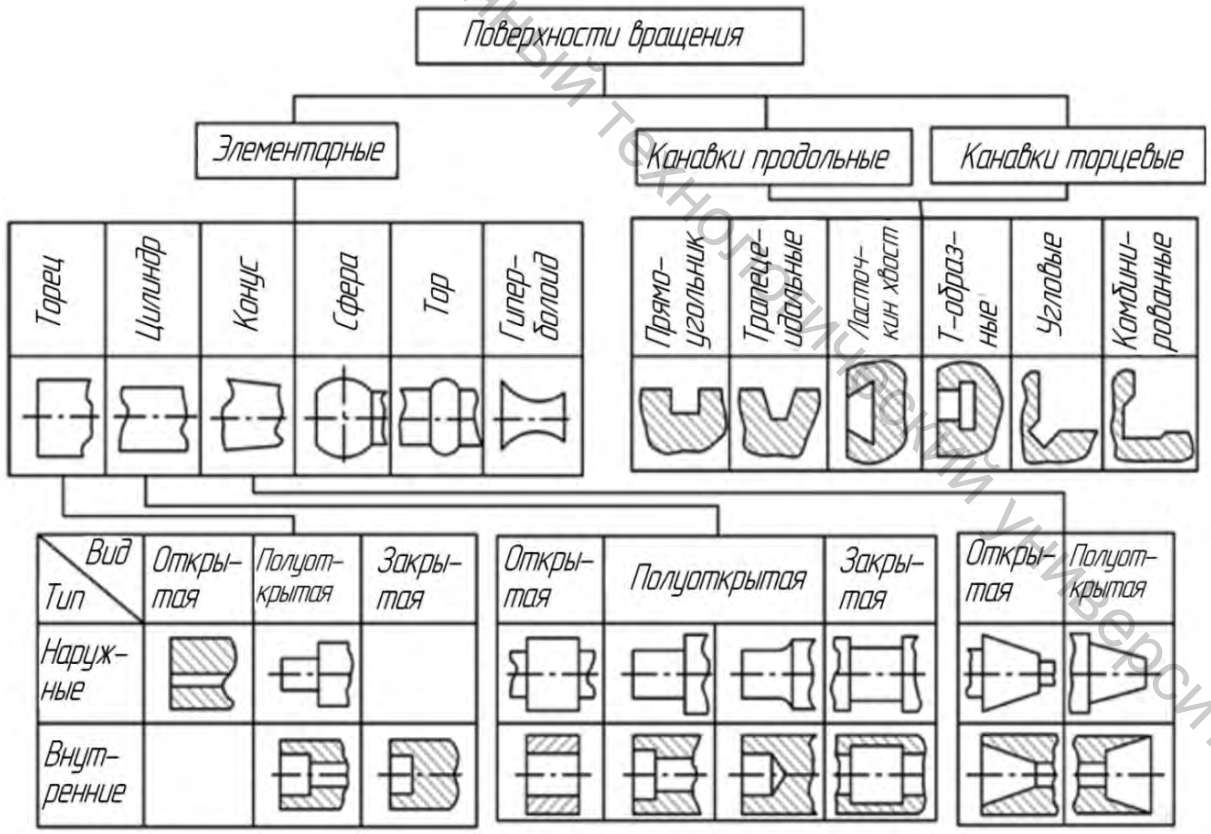


Рисунок 1.5 – Классификационная схема поверхностей вращения

Витебский государственный технологический университет

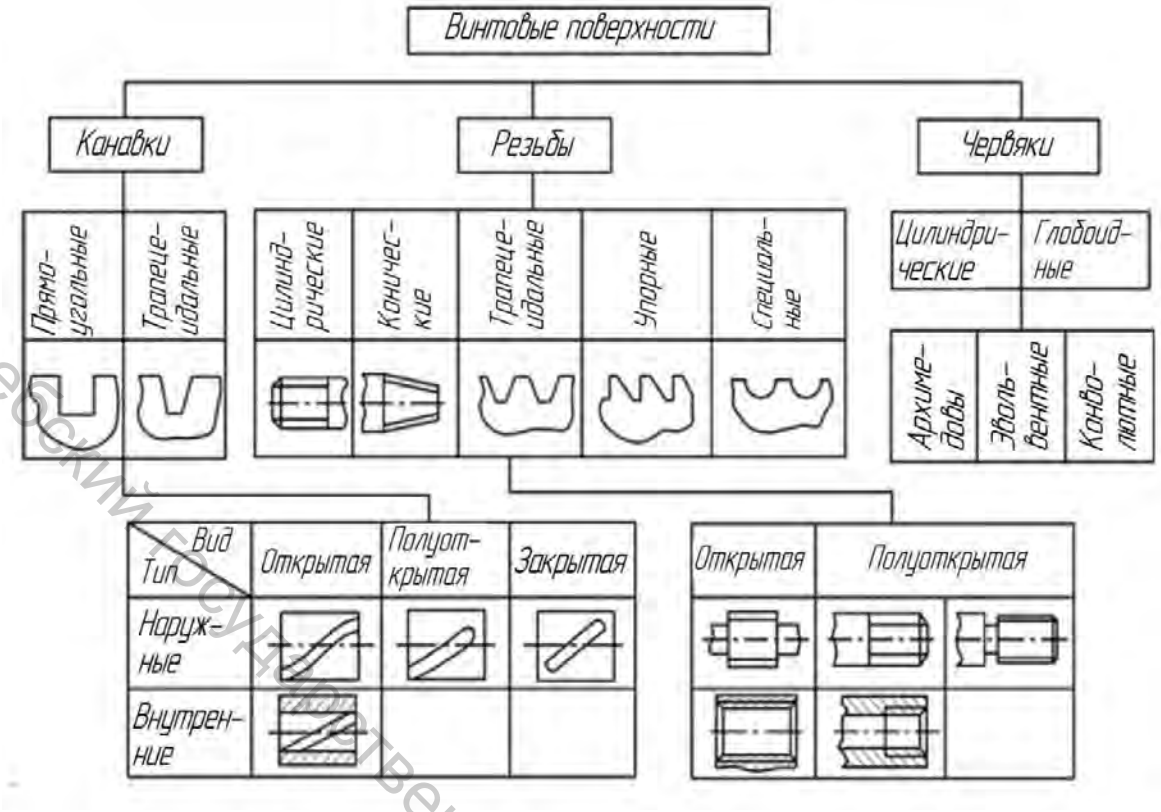


Рисунок 1.6 – Классификационная схема винтовых поверхностей

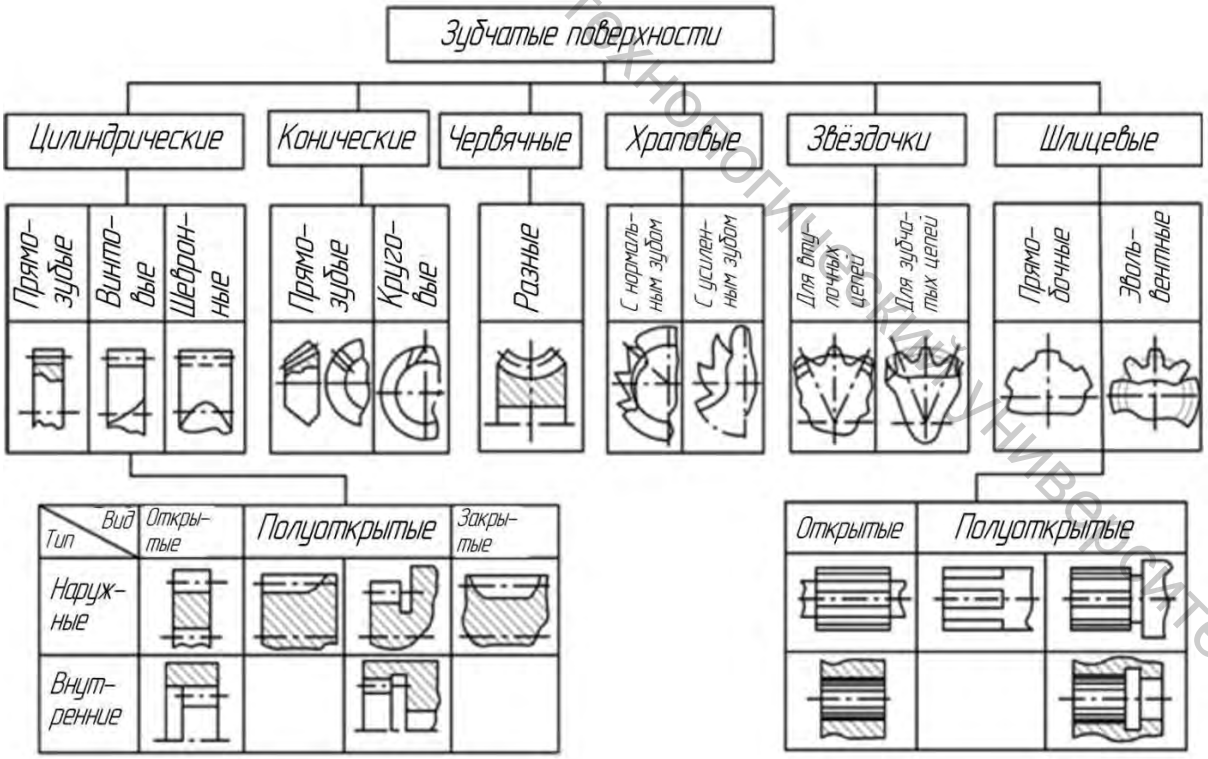


Рисунок 1.7 – Классификационная схема зубчатых поверхностей

Витебский государственный технологический университет

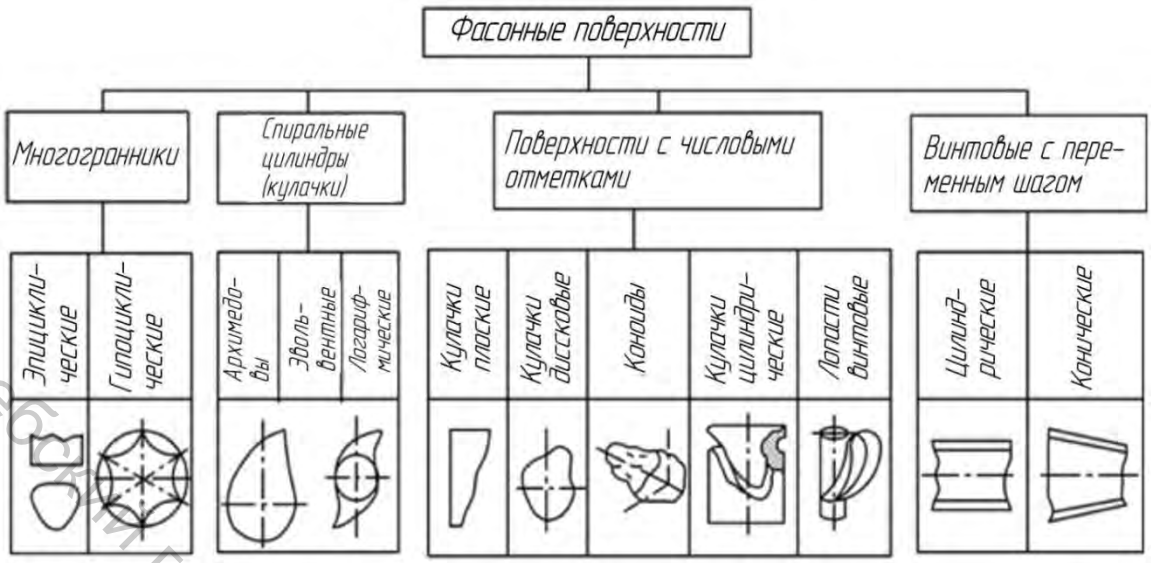


Рисунок 1.8 – Классификационная схема фасонных поверхностей

Для полного описания типовой поверхности необходимо указать еще ее геометрические и механические показатели качества. На чертеже эти показатели задаются размерами с указанием допустимых отклонений (размеров, взаимного положения и формы), значениями *Ra* (или *Rz*) и твердостью.

Размеры многих типовых поверхностей (зубчатых, резьбы, Т-образных канавок и т.д.) можно разделить на *независимые* (или *определяющие*) и *зависимые*, значения которых определены значениями независимых размеров. Так, модуль и число зубьев прямозубой шестерни определяют наружный, средний и внутренний диаметры зубчатого венца, высоту и толщину зуба, параметры его эвольвентного профиля.

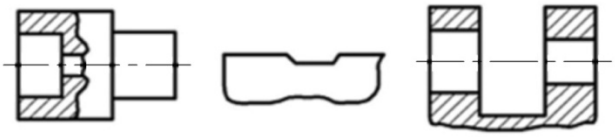
Кроме того, границы типовых поверхностей «снабжаются» вспомогательными поверхностями: фасками, канавками для выхода инструмента и (или) галтелями. Размеры этих поверхностей, которые чаще всего выполняют свою функцию только в процессе изготовления детали или машины, также являются зависимыми.

С каждой типовой поверхностью можно связать локальную систему координат с главной осью *Z*. Тогда взаимное расположение двух типовых поверхностей (*i*-й и *j*-й) в детали характеризуется расстоянием между началами их локальных систем координат (O_i и O_j), а также углами между главными локальными осями Z_i и Z_j. На рисунке 1.9 показаны варианты взаимного расположения типовых поверхностей.

Несколько типовых поверхностей детали, выполняющих одну общую функцию или некоторый набор однородных функций, назовем функциональным модулем детали. Очень часто в нем можно выделить определяющие и зависимые размеры. Например, на рисунке 1.10 показан функциональный модуль корпусной детали, служащий для ориентации и закрепления шарикоподшипника. Он состоит из основного полу-

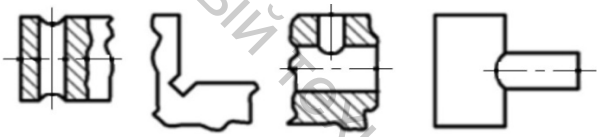
Витебский государственный технологический университет

открытого отверстия, размеры D и L которого являются независимыми. Размеры фаски и канавки для выхода инструмента зависят от размера D. Соосно с основным отверстием расположено отверстие *2*, размеры D_1 и L_1 которого зависят от D. Требования к перпендикулярности торцев *3* и *4* к оси отверстия *1* зависят от требований точности, предъявляемых к отверстию *1* (его диаметру D). В функциональный модуль входят также n резьбовых отверстий, количество которых, радиус их расположения R, параметры резьбы и ее длина также зависят от D. Таким образом, рассматриваемый функциональный модуль включает 26 типовых поверхностей.

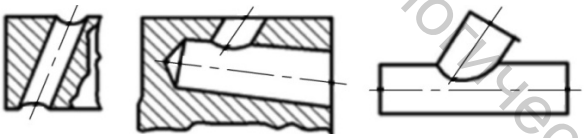


а

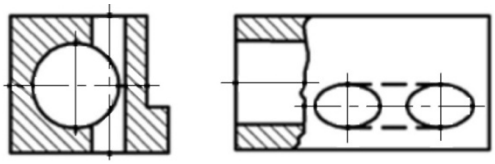
б



в



г



д

Рисунок 1.9 – Варианты относительного расположения типовых поверхностей:
а – соосных, б – параллельных, в – пересекающихся под прямым углом, г – пересекающихся под острым (тупым) углом, д – скрещивающихся

Витебский государственный технологический университет

Многие нормализованные детали (пальцы, фланцы, крышки, детали муфт и т.д.) образуют единый функциональный модуль. Например, крышка, при помощи которой будет закрепляться шарикоподшипник в основном отверстии корпуса (рис. 1.10), представляет собой функциональный модуль, все размеры которого зависят от *D*.

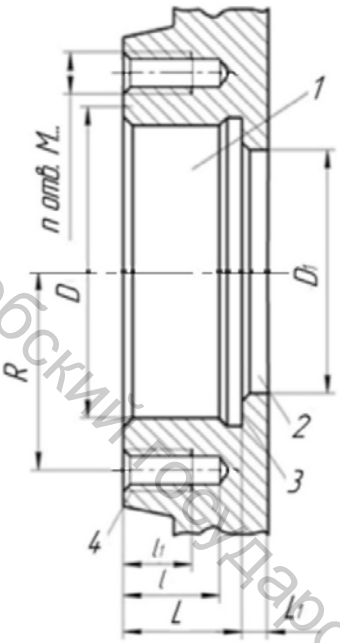


Рисунок 1.10 – Функциональный модуль корпусной детали

Функциональные модули детали выполняют функции ориентации (с лишением шести, пяти или четырех степеней свободы) или самой детали в сборочной единице, или присоединяемой к ней детали, а также восприятия сил и моментов. Кроме функциональных модулей, функциональных типовых поверхностей и вспомогательных поверхностей деталь имеет так называемые свободные поверхности, которые выполняют функции объединения функциональных компонентов в деталь.

Конструкторско-технологическая классификация деталей машин является задачей намного более сложной, чем классификация их компонентов. Решение этой задачи было начато в 1937 году А. П. Соколовским и затем продолжено в работах Ф. С. Демьянюка и Е. И. Глущенко. Однако, как показывает анализ их работ, разработать детальный общемашиностроительный классификатор, который бы мог служить рабочим инструментом технологу машиностроителю, пожалуй, невозможно. Задача становится реальной, если проводить классификацию в пределах отрасли машиностроения, а еще лучше – в пределах предприятия.

Классификацию деталей следует проводить по следующим четырем признакам: функционально-геометрическому; размерному; точностному; по применяемому материалу. Геометрическая форма детали предопределяется ее функцией и вместе с габаритными размерами, показателями точности, материалом и его твердостью предопределяет технологию ее изготовления для конкретного типа производства.

В основу иерархической системы конструкторско-технологической классификации (рис. 1.11) положена и геометрическая форма и служебное назначение (функция) детали, тесно связанные между собой. На следующих уровнях классификации форма деталей уточняется. Например, подкласс «валы» делится на шесть групп: ступенчатые валы; шпиндели; вал-шестерни; ходовые винты; валы-червяки; кулачковые валы. Затем, в зависимости от наличия осевого и радиального отверстий, шпоночных пазов, шлицевых поверхностей, резьбы и ком-

Витебский государственный технологический университет

бинаций указанных функциональных поверхностей, группа ступенчатых валов делится на подгруппы и т.д.

Следует отметить, что в каждой отрасли машиностроения применяется набор деталей оригинальной формы, которые редко или совсем не встречаются в машинах других отраслей. Например: станины и шпиндели металлорежущих станков; цилиндры, линотипные матрицы, шпационные клинья и рамы полиграфических машин; иглы и цилиндры трикотажных машин, челноки швейных машин и т.д. С другой стороны, очень многие детали являются «универсальными», т.е. применяются в самых разных машинах.

По второму признаку (габаритным размерам) все детали подразделяются на четыре группы: мелкие, средние, крупные и особо крупные. Границы между группами условны и нечетки. В некоторых случаях предпочитают относить деталь к той или иной габаритной группе по ее массе.

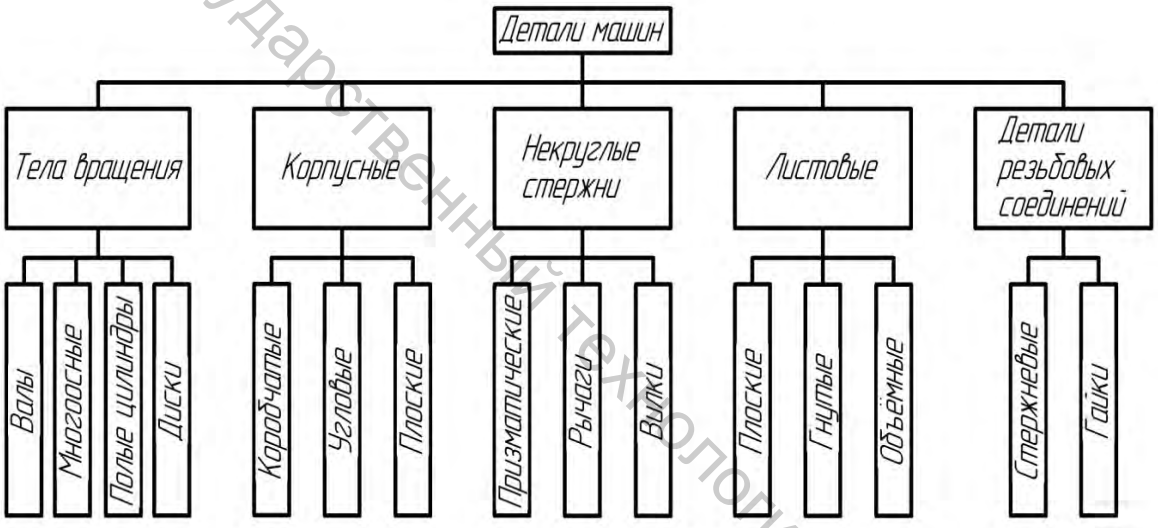


Рисунок 1.11 – Классификация деталей машин по форме (классы и подклассы)

По третьему признаку (наиболее высокому квалитету точности, установленному на какой либо размер детали) все детали также делятся на четыре группы: высокоточные (если максимальная точность линейных размеров соответствует 4-му и 5-му квалитетам), точные (6-му и 7-му квалитетам), средней точности (8-му, 9-му и 10-му квалитетам), неточные (11-му...14-му квалитетам).

По четвертому признаку (применяемому материалу) детали разделены на семь групп: стали конструкционные; стали легированные; чугуны; алюминиевые сплавы; медные сплавы; пластмассы; прочие материалы. Механические свойства и обрабатываемость резанием заготовок из стали существенно изменяются термической обработкой. Поэтому в первой и второй группах выделяются следующие подгруппы заготовок:

Витебский государственный технологический университет

из стали в состоянии поставки; из улучшаемой стали; из цементируемой стали; из закаливаемой стали [2–6].

1.3 Жизненный цикл изделия

Жизненный цикл изделия можно отразить в виде схемы, представленной на рисунке 1.12. Вначале предприятие изучает рынок спроса на изделие на момент его производства и его потребительские свойства. Затем осуществляет научно-исследовательские, опытно-конструкторские и технологические работы. В это время проводится конструкторско-технологическая подготовка производства, изготовление опытного изделия, его испытание и научные работы с целью совершенствования опытного образца. По завершению подготовки производства начинается серийный выпуск изделий [7–8].

Рисунок 1.12 – Жизненный цикл машиностроительного изделия

Витебский государственный технологический университет

В процессе эксплуатации изделия осуществляется его техническое обслуживание и текущий ремонт, затем осуществляется капитальный ремонт и частичная утилизация. По достижению изделием своего морального и физического старения проводится полная утилизация изделия. На этом изделие прекращает свое существование.

Значительное место в жизненном цикле изделия, а именно в его становлении, занимает технология машиностроения. Чем раньше в этом цикле будут задействованы технологи, тем выше эффективность и конкурентоспособность изделия. Уже на стадии маркетинга технологи могут оценить конкурентоспособность технологического процесса для выпуска изделия. Проведение научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ без учета технологии неэффективно, так как себестоимость изделия определяется с учетом технологии. В настоящее время прослеживается тенденция объединения конструкторских и технологических отделов. Актуальной становится специальность «конструктор-технолог».

Поэтому на ранних стадиях жизненного цикла изделия должен проводиться анализ технологичности. Под технологичностью изделия понимают совокупность его свойств, определяющих достижение минимальных затрат на производство, эксплуатацию и ремонт при заданных показателях качества, объема выпуска и условий выполнения.

Важную роль в жизненном цикле изделия играет техническая подготовка производства, которая включает:

– конструкторскую подготовку производства (разработка конструкции и изделия и разработка сборочных чертежей, чертежей деталей, спецификаций и другой конструкторской документации);

– технологическую подготовку производства (совокупность мероприятий, обеспечивающих создание комплекта технологической документации, наличие оснастки, инструмента и т.д.);

– календарное планирование производственного процесса изготовления изделия в установленные сроки при заданном объеме выпуска и затратах.

1.4 Компоненты технологического процесса механической обработки

Технологическим процессом называют часть производственного процесса, содержащую целенаправленные действия по изменению и (или) определению состояния изделия.

В ходе техпроцесса изготовления заготовок производятся целенаправленные действия по превращению материала в заготовки. В процессе термической обработки осуществляются структурные изменения

Витебский государственный технологический университет

в материалах заготовок. В ходе техпроцесса изготовления деталей производится последовательное изменение геометрической формы, размеров, точности и качества поверхностного слоя. Технологический процесс сборки связан с изменением взаимного положения собираемых узлов и (или) деталей путем их сопряжения.

По степени унификации различают следующие виды технологических процессов: единичный; типовой; групповой.

Вид технологического процесса определяется количеством изделий, охватываемых процессом (одно изделие, группы однотипных изделий).

Наименование процессов устанавливают по стандартам единой системы технологической подготовки производства (ЕСТПП).

Единичный технологический процесс – технологический процесс, относящийся к изделиям одного наименования, типоразмера и исполнения, независимо от типа производства (применяется для изготовления изделий одного наименования, типоразмера и исполнения независимо от типа производства).

Типовой технологический процесс – технологический процесс, характеризуемый единством содержания и последовательности большинства технологических операций и переходов для группы изделий с общими конструктивными признаками.

Типовой процесс применяется: как информационная основа при разработке рабочего технологического процесса; как рабочий технологический процесс при наличии всей необходимой информации для изготовления детали, или как база для разработки стандартов на типовые технологические процессы.

Типовой технологический процесс может являться совокупностью типовых технологических операций, которые характеризуются единством содержания и последовательности технологических переходов для группы изделий с общими конструктивными признаками.

Групповой технологический процесс – технологический процесс, характеризуемый единством методов обработки с использованием однородных и быстро переналаживаемых приспособлений для групп изделий даже с разными конструктивными признаками (но общими технологическими).

Групповой технологический процесс может состоять из групповых технологических операций, которые являются общими для групп различных деталей с определенной групповой оснасткой на данном оборудовании.

Таким образом, групповой технологический процесс – это совокупность групповых технологических операций, обеспечивающих изготовление различных деталей группы (или нескольких групп) по общему технологическому маршруту.

Витебский государственный технологический университет

Каждый вид технологических процессов характеризуется следующими признаками: основным назначением процесса (рабочий, перспективный); б) степенью детализации содержания процесса (маршрутный, операционный, маршрутно-операционный).

Рабочий технологический процесс – технологический процесс, выполняемый по рабочей и (или) конструкторской документации (применяется: для изготовления в соответствии с требованиями рабочей технической документации).

Перспективный технологический процесс – технологический процесс, соответствующий современным достижениям науки и техники, методы и средства осуществления которого полностью или частично предстоит освоить на предприятии (используются как информационная основа для разработки рабочих технологических процессов при техническом и организационном перевооружении производства; рассчитан на применение более совершенных методов обработки, более производительных и экономически эффективных средств технологического оснащения и изменения принципов организации производства).

Маршрутный технологический процесс – технологический процесс, выполняемый по документации, в которой содержание операций приводится без указания переходов и режимов обработки.

Операционный технологический процесс – технологический процесс, выполняемый по документации, в которой содержание операций излагается с указанием переходов и режимов обработки.

Маршрутно-операционный технологический процесс – технологический процесс, выполняемый по документации, в которой содержание отдельных операций излагается без указания переходов и режимов обработки.

Технологический процесс изготовления машины и ее элементов (деталей) дискретен в пространстве и времени. Он состоит из циклически повторяющихся для каждого объекта производства компонентов. С пространственно-функциональной точки зрения в технологическом процессе можно выделить следующие уровни иерархии разделения: *этапы*, *операции*, *установы*, *позиции*, *переходы* и *проходы*. Главным признаком *этапа* является уровень показателей качества обработанных поверхностей (квалитет точности размера *IT*, параметр шероховатости *Ra*, твердость *HB* или $HRC_э$), достигнутых после его выполнения. Таким образом, технологический процесс изготовления детали на первом уровне делится на этапы, совокупность которых образует *типовую схему обработки* [2–6].

Каждый *этап* состоит из одной или нескольких операций. *Операцией* будем называть законченную, повторяющуюся часть технологического процесса, которая выполняется на одном рабочем месте (на определенной технологической машине). Совокупность упорядоченных опе-

Витебский государственный технологический университет

раций образует *маршрут обработки*. Операция является также основным организационным элементом технологического процесса.

Основным признаком *установа* является неизменность положения обрабатываемой заготовки относительно станочного приспособления. В каждой операции может быть один или несколько (редко более двух) установов. На многопозиционных станках заготовка вместе с приспособлением последовательно переходит из одной *рабочей позиции* в другую, где она фиксируется на время обработки. На многих станках, кроме рабочей, выделяется *позиция загрузки* заготовки в приспособление.

Элементарным переходом будем называть законченный процесс образования одной типовой поверхности детали при ее обработке одним инструментом с конкретными режимами резания. *Инструментальным переходом* называется законченный процесс образования нескольких типовых поверхностей детали одним инструментом с конкретными режимами резания. *Блочным* называют переход, при котором выполняется законченный процесс образования поверхностей с помощью всех инструментов, закрепленных в блоке (суппорте многошпиндельной головке и т.д.). *Позиционный переход* – это совокупность всех блочных, а, следовательно, и всех инструментальных переходов, выполняемых при обработке детали в одной рабочей позиции станка. *Вспомогательным переходом* называют часть процесса, связанного со вспомогательными движениями рабочего и (или) механизмов станка, которые циклично повторяются и необходимы для выполнения процесса обработки детали на станке. Таким образом, операция – это комплекс всех инструментальных и вспомогательных переходов, выполняемых на одном рабочем месте с помощью определенного оборудования и оснастки.

Каждый элементарный переход можно формально представить некоторым множеством структурных и параметрических признаков. К первым относятся коды: формы обработанной поверхности, инструмента, станка и схемы установки заготовки. Ко вторым – размеры обработанной поверхности и допуски на них, показатели режима обработки (скорость резания V, подача s, глубина резания a и припуск Z). Все это относится и к инструментальному, блочному и позиционному переходам, а также может быть распространено на операцию. Если толщина срезаемого слоя (припуск Z или напуск) больше допустимой глубины резания a, то элементарный переход выполняется в несколько *проходов*.

Временная структура операции механической обработки характеризует ее с одной стороны количественно, указывая сколько (один или несколько) одинаковых компонентов содержит операция, а с другой стороны характеризует способ совмещения позиций, переходов и заготовок во времени и пространстве.

Количество рабочих позиций станка, инструментов и заготовок в каждой рабочей позиции, характер совмещения переходов и заготовок в рабочей позиции, характер совмещения вспомогательных и инструмен-

Витебский государственный технологический университет

тальных переходов, способ получения размера и смены инструмента определяют *временную структуру операции*. Классификация структур операций по указанным признакам осуществляется следующим образом. По количеству рабочих позиций *П* на станке операции делятся на: *однопозиционные* ($П_1$) и *многопозиционные* ($П_n$). В зависимости от количества инструментов *И* (переходов) в каждой рабочей позиции различают: *одноинструментные* ($И_1$) и *многоинструментные* ($И_m$) операции. В зависимости от количества заготовок *D*, обрабатываемых в каждой позиции, различают: *однодетальные* (D_1) и *многодетальные* ($D_к$) операции.

По способу совмещения переходов и заготовок в рабочих позициях различают: *несовмещенные* (0) операции, операции с *последовательным* (1) или *параллельным* (2) совмещением переходов и (или) заготовок, а также операции с *последовательно-параллельным* совмещением (3). Обычно обработка в разных рабочих позициях станка проводится одновременно (параллельно), но бывают станки, где обработка в разных рабочих позициях проводится последовательно, то есть пока идет обработка в одной из позиций, инструменты в других простаивают. Способ совмещения кодируется соответствующим символом (0, 1, 2 или 3), который записывается как показатель степени над символами качественных признаков (*П*, *И* и *D*).

По характеру совмещения вспомогательных и инструментальных переходов различают: *однозонные периодические* ($З_1^n$), *двузонные периодические* ($З_2^n$) и *двузонные непрерывные* ($З_2^n$) операции. В первом случае на станке рабочая зона совпадает пространственно с зоной загрузки заготовки. Следовательно, совмещение во времени вспомогательных и инструментальных переходов невозможно. В двузонных операциях зона загрузки выделена пространственно и поэтому вспомогательные переходы могут полностью или частично совмещаться во времени с инструментальными.

В периодических операциях после выполнения рабочих движений инструмент и (или) заготовка возвращаются в исходное положение. То есть выполняется вспомогательный переход, не совмещенный с инструментальным. А в непрерывных операциях вектор подачи заготовки в рабочую зону совпадает с вектором рабочей подачи, обработка ведется «на проход», поэтому нет необходимости в выполнении вспомогательного перехода возврата в исходное положение.

Операции, выполняемые на универсальных станках (токарных, сверлильных, фрезерных, шлифовальных), обычно являются однопозиционными и однозонными периодическими. Если обработка одной заготовки ведется одним инструментом, то код временной структуры такой операции имеет вид $П_1^0 И_1^0 D_1^0 З_1^n$.

Витебский государственный технологический университет

На рисунках 1.13–1.15 показаны некоторые примеры структур операций. В операции, показанной на рисунке 1.13, отверстие обрабатывается последовательно разными инструментами. Поэтому код временной структуры такой операции имеет вид $П_1^0 И_m^1 D_1^0 З_1^n$.

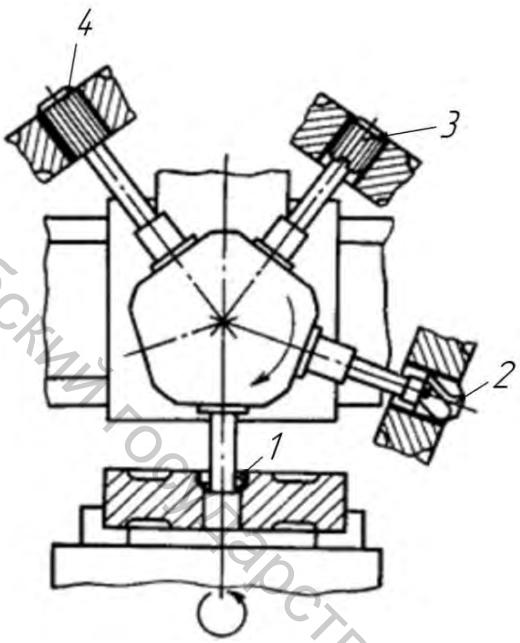
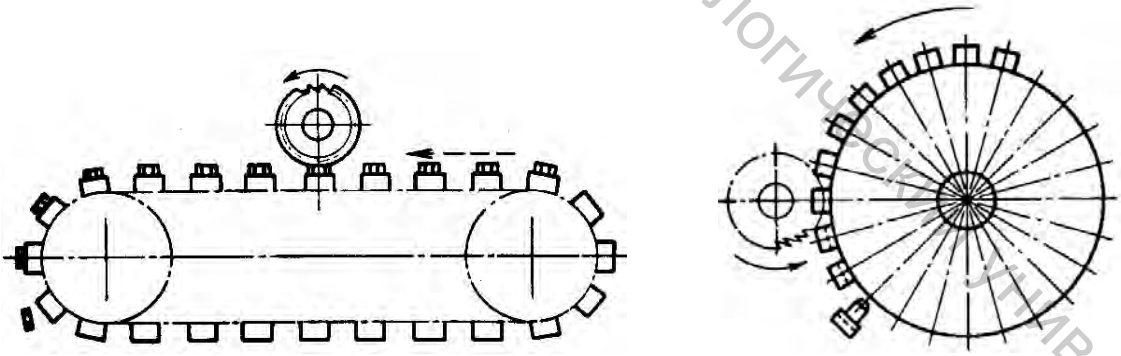


Рисунок 1.13 – Схема операции обработки отверстия на токарно-карусельном станке

Обработка вала (рис. 1.14) ведется двумя блоками резцов, один из которых осуществляет продольное, а другой – поперечное точение. Оба блока работают одновременно. Поэтому код временной структуры такой операции имеет вид $П_1^0 И_m^2 D_1^0 З_1^n$. В операциях, показанных на рисунке 1.15, в рабочую зону последовательно и непрерывно подаются фрезеруемые заготовки. Загрузка заготовок и выгрузка обработанных деталей осуществляется вне рабочей зоны. Поэтому код временной структуры такой операции имеет вид $П_1^0 И_1^0 D_к^1 З_2^н$.

Временная структура операции определяет структуру и уровень затрат времени на ее выполнение.



а б

Рисунок 1.14 – Схемы операций обработки деталей на фрезерных полуавтоматах:
а – транспортер цепного типа, б – транспортер барабанного типа

Любая техническая система должна иметь, по крайней мере, две шкалы оценок: экономической эффективности и качества выполнения возложенных на систему функций. Эффективность функционирования

Витебский государственный технологический университет

технической системы определяется экономической целесообразностью ее использования.

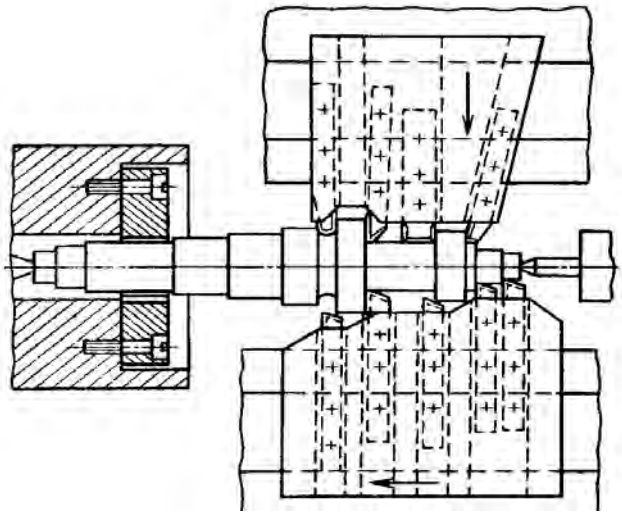


Рисунок 1.15 – Схема операции обработки вала на многорезцовом полуавтомате

1.5 Вопросы для самоконтроля

1. Определите различия понятий «заготовка» и «деталь».
2. Охарактеризуйте понятие «основные (исполнительны) элементы машины».
3. Перечислите вспомогательные элементы машины.
4. Приведите схему классификации соединений деталей машин.
5. Перечислите функции компонентов детали.
6. Дайте определение понятию «основная сборочная база».
7. Дайте определение понятию «вспомогательная сборочная база».
8. Приведите схему классификации поверхностей.
9. По какому критерию определяется класс поверхности?
10. Перечислите классы поверхностей.
11. По какому критерию определяется подкласс поверхности?
12. По какому критерию определяется группа поверхности?
13. По какому критерию определяется вид поверхности?
14. Перечислите виды поверхностей.
15. По какому критерию определяется тип поверхности?
16. Перечислите типы поверхностей.
17. Приведите схему классификации поверхностей вращения.
18. Приведите классификационную схему плоских поверхностей.
19. Приведите классификационную схему зубчатых поверхностей.
20. Приведите схему классификации винтовых поверхностей.
21. Приведите схему классификации фасонных поверхностей.

Витебский государственный технологический университет

22. Дайте определение понятию «функциональный модуль».

23. Приведите пример функционального модуля.

24. По каким признакам проводится классификация деталей?

25. На какие классы и подклассы по форме делятся детали машин?

26. Перечислите этапы жизненного цикла изделия.

27. Какую роль в жизненном цикле изделия играет техническая подготовка производства?

28. Дайте определение понятию «технологический процесс».

29. Как различают технологические процессы в зависимости от степени унификации?

30. Определите понятие «единичный технологический процесс».

31. Определите понятие «типовой технологический процесс».

32. Определите понятие «групповой технологический процесс».

33. Определите понятие «рабочий технологический процесс».

34. Определите понятие «перспективный технологический процесс».

35. Определите понятие «маршрутный технологический процесс».

36. Определите понятие «операционный технологический процесс».

37. Определите понятие «маршрутно-операционный технологический процесс».

38. Что является признаком этапа технологического процесса?

39. Что является признаком операции технологического процесса?

40. Что является признаком установа технологического процесса?

41. Что является признаком перехода технологического процесса?

42. Дайте определение понятию «элементарный переход».

43. Дайте определение понятию «инструментальный переход».

44. Дайте определение понятию «блочный переход».

45. Дайте определение понятию «позиционный переход».

46. Дайте определение понятию «вспомогательный переход».

47. Назовите структурные и параметрические признаки элементарного перехода.

48. Дайте определение понятию «временная структура операции».

49. Назовите признаки классификации структур операции.

50. Как различают структуры операции по способу совмещения позиций, инструментов и заготовок?

51. Как различают структуры операции по характеру совмещения вспомогательных и инструментальных переходов?

52. Расшифруйте код временной структуры операции $П_1^0 И_m^1 D_1^0 З_1^п$.

53. Расшифруйте код временной структуры операции $П_1^0 И_m^2 D_1^0 З_1^п$.

54. Расшифруйте код временной структуры операции $П_1^0 И_1^0 D_к^1 З_2^н$.

Витебский государственный технологический университет

2 КАЧЕСТВО ПРОМЫШЛЕННОЙ ПРОДУКЦИИ

2.1 Петля и система качества

Качество изделия, согласно международному стандарту, представляет собой совокупность ее свойств и характеристик, которые придают ей способность удовлетворять обусловленные или предполагаемые потребности. Это определение опирается на технико-экономическую природу качества. В общем случае множество свойств, образующих качество изделия, должно рассматриваться в единстве и взаимодействии [9–10].

Объектами управления качества продукции являются все элементы, образующие петлю качества. Под *петлей качества* в соответствии с международными стандартами ИСО понимают замкнутый в виде кольца жизненный цикл продукции, включающий следующие основные этапы: маркетинг; проектирование и разработку технических требований, разработку продукции; материально-техническое снабжение; подготовку производства и разработку технологии и производственных процессов; производство; контроль, испытания и обследования; упаковку и хранение; реализацию и распределение продукции; монтаж; эксплуатацию; техническую помощь и обслуживание; утилизация (см. главу 1). Нужно иметь в виду, что в практической деятельности в целях планирования, контроля, анализа и пр. эти этапы могут разбивать на составляющие. Наиболее важным здесь является обеспечение целостности процессов управления качеством на всех этапах жизненного цикла продукции.

С помощью петли качества осуществляется взаимосвязь изготовителя продукции с потребителем и со всеми объектами, обеспечивающими решение задач управления качеством продукции.

Управление качеством продукции осуществляется циклически и проходит через определенные этапы, именуемые циклом Деминга. Реализация такого цикла называется оборотом цикла Деминга.

Понятие цикла Деминга не ограничивается только управлением качества продукции, а имеет отношение и к любой управленческой и бытовой деятельности. Последовательность этапов цикла Деменга включает: планирование (*PLAN*); осуществление (*DO*); контроль (*CHECK*); управление воздействием (*ACTION*).

В круговом цикле, который мы подсознательно используем в повседневной жизни, заключается сущность реализации так называемых общих функций управления, рассмотренных ранее, имея в виду, что эти функции направлены на обеспечение всех условий создания качественной продукции и качественного ее использования.

Витебский государственный технологический университет

Таким образом, при управлении качеством в целях обеспечения системности этого процесса необходимо объединить кольцо качества с циклом (кругом) Деминга, что будет характеризовать основные виды действий на протяжении жизненного цикла продукции. Тогда полнота основных видов деятельности на всем поле полученной матрицы будет характеризовать степень комплексности процесса управления качеством по отдельным видам продукции.

Управление качеством отличается от контроля, который в основном сводится к отделению хороших изделий от плохих. Качество продукта после завершения процесса производства не может быть изменено в результате контроля.

Управление качеством имеет дело со всей системой разработки, производства, эксплуатации (потребления) и утилизации товара. Задачей управления качеством является установление причин брака, где бы он ни возникал, а затем устранение этих причин и обеспечение производства продукции лучшего качества.

Система качества – это совокупность организационной структуры, методик, процессов и ресурсов, необходимых для общего руководства качеством.

Система качества создается и внедряется на предприятии как средство, обеспечивающее проведение политики в области качества – достижение поставленных стратегических целей.

В основе организации систем качества лежат шесть принципов: соответствия; документирования; единоначалия; подконтрольности; комплексности; законности.

Из всех требований к системе качества (СК), изложенных в двадцати разделах международных стандартов ИСО серии 9000, важнейшими (определяющими и системообразующими) являются требования к разработке и документальному оформлению политики в области качества и руководства по качеству.

2.2 Уровни и критерии качества

2.2.1 Понятие уровня качества

В зависимости от сложности изделия и цели исследования признают целесообразным введение нескольких уровней качества. Эмпирически установлены уровни качества, получившие названия: *устойчивость, помехоустойчивость*, *управляемость, способность, самоорганизация.*

Первичным качеством любой системы является ее *устойчивость* (*R*-качество). Системы, не обладающие этим качеством, не могут существовать. Для простых систем устойчивость объединяет такие их свой-

Витебский государственный технологический университет

ства, как прочность, стойкость к воздействию внешних факторов. Для сложных систем характерны различные формы структурной устойчивости, такие как надежность, живучесть и т.д.

Другим качеством систем, более сложным, чем устойчивость, является *помехоустойчивость* (*I*-качество), понимаемая как способность системы без искажений воспринимать и передавать по каналам сообщений информационные потоки. Помехоустойчивость объединяет ряд свойств, присущих в основном подсистемам управления. К таким свойствам относятся надежность систем связи и систем переработки информации, их пропускная способность, возможность эффективного кодирования и декодирования информации.

Следующим качеством системы является *управляемость* (*C*-качество). Под управляемостью понимают способность системы переходить за конечное (заданное) время из одного состояния в другое (требуемое) состояние под влиянием управляющих воздействий. В общем смысле управляемость есть способность системы выполнять команды управления, оперативно реагировать на них. Очевидно, управлять можно лишь помехоустойчивой системой. Управляемость объединяет такие свойства системы, как *гибкость управления*, его *оперативность*, *точность*, *быстродействие*, *инерционность* и др.

В ряду усложнения качества следующее место после управляемости занимает *способность* системы (*A*-качество). Данное качество объединяет совокупность свойств системы, определяющих ее функциональное назначение (производственное, транспортное, информационное и т.д.). К таким свойствам могут быть отнесены: *производительность*, *мощность*, *обеспеченность* различного рода ресурсами и т.д.

Наиболее сложным качеством системы является *самоорганизация* (*L*-качество). Этим качеством обладают системы большой сложности, способные изменять свою структуру, параметры, ориентацию поведения в целях наилучшего выполнения своих функций. Самоорганизующаяся система обнаруживает свойства, принципиально важными из которых являются: *свобода выбора решений, способность к адаптации, самообучению, распознаванию ситуаций* и т.п.

Система, обладающая данным качеством (например, *C*-качеством), имеет и все другие более простые качества (*I* и *R*-качества), но не имеет качеств более высокого порядка (*A* и *L*-качества).

2.2.2 Понятие критерия качества

Критерием качества обычно является один из показателей функционирования технической системы. Оценка качества технического ре-

Витебский государственный технологический университет

шения может осуществляться по одному или нескольким критериям качества, которые должны быть *измеримыми* (исчисляемыми) и *сопоставимыми*. То есть критерий качества должен быть количественным и иметь такую размерность, которая позволяет сопоставлять технические решения, полученные в разных странах и в разное время [1].

Вся совокупность критериев качества, относящаяся к данному классу технических систем, должна содержать только такие, которые не могут быть логически выведены из других критериев или не могут быть их прямым следствием (*принцип логической независимости критериев*). Однако между критериями качества могут быть физические взаимосвязи. *Количество критериев качества должно быть минимальным, но достаточным для оценки эффективности технического решения.*

Критерии качества не только *взаимозависимы*, но обычно «*конфликтуют*» друг с другом. Так, если повысить производительность и надежность, то соответственно ухудшаются экономические показатели, т.е. повышается стоимость. А повышение производительности технической системы часто приводит к снижению ее надежности. И снижение первоначальной стоимости системы приводит иногда к повышению эксплуатационных затрат.

Критерии качества обладают различным уровнем общности. Каждый критерий может относиться: 1) к одному классу технических систем с одинаковыми или близкими функциями; 2) к нескольким классам технических систем с различными функциями, но определенными общими свойствами; 3) ко всем классам технических систем с любыми функциями.

В набор критериев качества входят следующие группы:

– *функциональные критерии*, характеризующие качество выполнения заданных функций рассматриваемой технической системы;

– *конструктивные критерии*, которые определяют габаритно-весовые характеристики и технические решения, обеспечивающие удобство монтажа, приспособленность системы к агрегатированию и взаимозаменяемости;

– *критерии технологичности* определяют свойство системы обуславливать оптимальное распределение затрат ресурсов при технологической подготовке производства системы, ее изготовлении и эксплуатации;

– *экономические критерии*, определяющие экономическую целесообразность реализации требуемых функций с помощью рассматриваемой ТС; они определяют денежные, временные, трудовые, энергетические и материальные затраты на разработку, изготовление, эксплуатацию и ликвидацию системы;

– *экологические критерии* определяют уровень вредных воздействий на окружающую среду при производстве, эксплуатации и ликви-

Витебский государственный технологический университет

дации системы (содержание и вероятность выброса вредных газов, жидкостей или сыпучих материалов);

– *эргономические критерии*, определяющие соответствие гигиенических, антропометрических, физиологических и психологических свойств человека условиям функционирования рассматриваемой ТС и ее воздействием на человека;

– *эстетические критерии*, относящиеся к технологическому оборудованию и оснастке, отражают рациональность формы, совершенство исполнения и стабильности товарного вида (чистота выполнения контуров и сопряжений, тщательность покрытий и отделки, устойчивость к повреждению).

Одним из важнейших критериев качества технических систем является критерий *конкурентоспособности.* Этот критерий отражает совокупность ее свойств и характеристик, обеспечивающих преимущественную (по сравнению с другими системами с аналогичными функциями) возможность реализации данной технической системы на конкретном внутреннем или внешнем рынке в рассматриваемый период времени.

Основными критериями, определяющими *конкурентоспособность* технических систем, являются:

– *технический уровень системы*, выражающий относительное техническое совершенство данной технической системы по сравнению с другими системами аналогичного назначения, поставляемыми (или имеющими перспективу поставки) на тот же рынок;

– *экономический уровень системы*, определяемый относительной величиной затрат потребителя на приобретение и использование данной технической системы по сравнению с другими аналогичными системами, включая оплату таможенных сборов, налоги, расходы на транспортирование, монтаж и наладку приобретенной системы, оплату запасных частей, материалов и затрат энергии, расходы на обслуживание и ремонт и т.д.;

– *патентно-правовая защищенность системы*, определяемая применительно к условиям конкретного рынка.

Показатели качества классифицируют еще по следующим признакам: *характерным свойствам*, *количеству свойств*, *применению*, *этапам жизненного цикла*.

По количеству свойств показатели качества могут быть *единичные, комплексные, групповые, интегральные и обобщенные*.

По применению показатели качества делят на *базовые* и *относительные*.

В зависимости от этапа жизненного цикла показатели качества могут быть *прогнозируемые* (расчетные), *проектные, производственные* и *эксплуатационные*. Показатели качества выражаются в натуральных и стоимостных единицах.

Витебский государственный технологический университет

При обеспечении и оценке технического и экономического уровня технической системы на этапах проектирования учитывается вся совокупность критериев качества, приведенная выше.

Функциональные, конструктивные, эргономические, экологические эстетические критерии определяют полезный эффект при эксплуатации системы, а также прогрессивность технических решений, заложенных в нее. Эти критерии можно назвать *эксплуатационными показателями качества.*

Производственно-технологические показатели характеризуют затраты труда на единицу продукции и свидетельствуют о степени соответствия конструкции машины производственно-техническим условиям её изготовления. К *показателям технологичности относят* материалоёмкость, энергоёмкость, блочность, показатели стандартизации и унификации.

К экономическим показателям относятся: индекс эффективности, срок окупаемости, приведенные затраты, общественная производительность труда и др.

Ниже подробнее рассматриваются наиболее часто используемые критерии качества. Это следующие функциональные критерии качества: производительности, точности, универсальности, гибкости и надежности. Экономические: индекс эффективности, срок окупаемости, приведенные затраты, общественная производительность труда и косвенный критерий сложности. Из эргономических будет рассмотрен один из важных критериев – критерий безопасности.

2.2.3 Критерии производительности и точности

Производительность характеризует интенсивность работы технической системы. Критерий производительности всегда может быть измерен или вычислен. Структура формулы для вычисления и единицы измерения производительности может быть различной для различных систем. Так, например, для токарного автомата производительность обычно характеризуется количеством деталей, обрабатываемых за определенный отрезок времени (минута, час, смена, сутки). При этом различают *технологическую* Q_T, *цикловую* $Q_Ц$ и *фактическую* $Q_Ф$ производительность. Первая отражает затраты времени на формообразование ($t_о$), т.е.

$$Q_Ф = \frac{60}{t_o} \ .$$

Витебский государственный технологический университет

Цикловая производительность отражает затраты времени на цикл обработки детали, то есть кроме затрат времени на формообразование учитываются еще затраты времени $t_в$ на вспомогательные переходы (на установку и закрепление заготовки, на холостые перемещения, на измерения и т.д.):

$$Q_Ц = \frac{60}{t_о + t_в} .$$

Фактическая производительность отражает еще внецикловые потери времени $t_п$ на наладку и ремонт станка, на ожидание заготовок, замену затупившегося инструмента и т.д., относящиеся к одной детали:

$$Q_Ф = \frac{60}{t_о + t_в + t_п}.$$

Связь между этими видами производительности показана на рисунке 2.1. Чтобы можно было сравнивать производительность формообразования независимо от размеров обрабатываемой детали (поверхности), введено *понятие удельной технологической производительности* $Q_У$, которая отражает затраты времени на формообразование одного квадратного сантиметра поверхности

$$Q_У = Q_Т \cdot F 60,$$

где F – суммарная площадь обработанных поверхностей детали.

Производительность локомотивов, двигателей и насосов характеризует их мощность. Так, производительность насоса W отражает не только объем жидкости, перекачиваемой насосом за минуту (Q), но и высоту h, на которую эта жидкость поднимается. Последний показатель косвенно характеризует давление, которое преодолевается насосом. Таким образом, в данном случае формула для расчета производительности имеет вид $W = Q \cdot h$.

Критерий точности характеризует степень отклонения какого-либо показателя $P_ф$ технической системы от заданного значения $P_з$. Можно рассматривать точность изготовления и точность измерения. Связь между этими показателями показана на рисунке 2.2. Разницу между фактическим значением показателя и его заданным или измеренным значением будем называть соответственно погрешностью изготовления $П_и$ и погрешностью измерения $П_к$ (контроля). Эти погрешности являются случайными величинами, значения которых ограничиваются. То есть на них накладывается допуск TP. Отношения между заданным (номинальным) значением показателя $P_н$ и множеством его фактических

Витебский государственный технологический университет

значений показаны на рисунке 2.3. Показателем *P* может быть размер, форма, взаимное расположение элементов системы, скорость движения, сила и т.д.

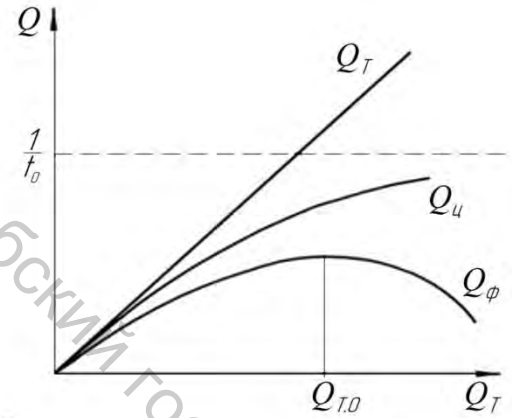


Рисунок 2.1 – Зависимость цикловой и фактической производительности от технологической

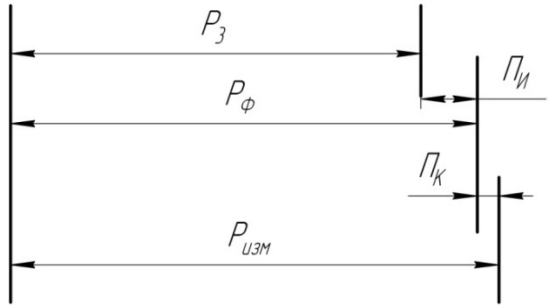


Рисунок 2.2 – Схема связи между критериями точности

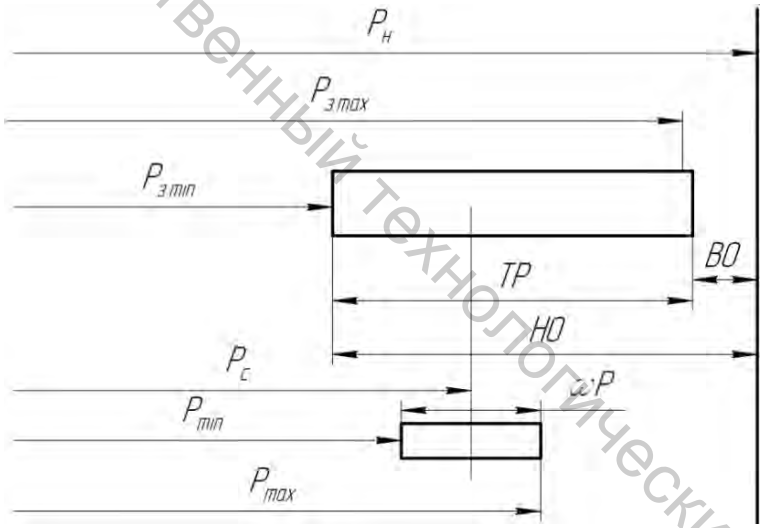


Рисунок 2.3 – Схема связи между критериями точности:
$P_н$, $P_з$ и P_c – номинальное, заданное и среднее значение критерия;
ТР – допуск на значение критерия; *ωP* – поле рассеяния критерия;
ВО и *НО* – верхнее и нижнее отклонение от $P_н$

2.2.4 Критерии универсальности и гибкости

Если изделие может выполнять несколько полезных функций, то ее *универсальность* следует отражать не только ассортиментом (множеством разных) полезных действий ($A_Д$), но и ассортиментами ($A_О$) объектов, на которые направлены полезные действия, ассортиментами

Витебский государственный технологический университет

начальных (A_H) и конечных (A_P) состояний этих объектов. Состояние характеризуется показателями механических свойств и геометрическими показателями (коды форм, размеры и допуски). Тогда универсальность ($У_H$) изделия можно условно охарактеризовать следующим выражением:

$$У_H = \ln(A_Д \cdot A_O \cdot A_H \cdot A_P).$$

У специального изделия $A_Д = A_O = A_H = A_P = 1$. Следовательно, в этом случае $У_H = 0$. Если множество относится к дискретным величинам ($A_Д$ и A_O), то его мощность можно пересчитать. Если множество должно характеризовать диапазон непрерывных величин (A_H и A_P размеры), то его мощность вычисляется по формуле

$$A_H = \frac{A_{H.\max} - A_{H.\min}}{\Delta A_H};\ A_p = \frac{A_{P.\max} - A_{P.\min}}{\Delta A_P};$$

где ΔA_H и ΔA_P – условные дискреты изменения размеров. Их можно принять, например, равными соответствующим допускам.

Например, шпиндельная бабка вертикально-сверлильного станка обеспечивает выполнение двух действий: вращение шпинделя и его осевая подача ($A_Д = 2$). Оба эти действия выполняются только над шпинделем ($A_O = 1$). Множество частот вращения равно числу ступеней коробки скоростей N_n, а множество подач равно числу ступеней коробки подач N_S. Тогда условный показатель универсальности $У_H$ будет равен

$$У_H = \ln(2 \cdot N_n \cdot N_S).$$

Если, например, технической системой является приспособление для взаимной ориентации заготовки и инструмента (кондуктор) при сверлении на вертикально-сверлильном станке отверстий разного диаметра D, но расположенных на одинаковых расстояниях от технологических баз, то его показатель универсальности можно вычислить по формуле

$$У_H = \ln \frac{D_{\max} - D_{\min}}{\Delta D},$$

где ΔD – дискрета изменения D. Это максимальная универсальность. Реальная ($У_{Hр}$) может быть значительно меньше.

Витебский государственный технологический университет

$$У_{Нр} = \ln(N_в),$$

где $N_в$ – количество кондукторных втулок.

Гибкость характеризует относительные затраты ресурсов (времени) на ее подготовку к переходу на новые показатели функции (*Д*, *О*, *Н* и *Р*). Показатель гибкости можно вычислить по формуле

$$Гб = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} P_i \cdot \left(\frac{T_p}{T_н + T_p}\right)_i,$$

где *Гб* – показатель гибкости; $T_{нi}$ и T_{pi} – затраты времени на переналадку и работу технической системы в *i*-й ситуации; P_i – вероятность *i*-й ситуации; *n* – число возможных ситуаций. Данное выражение отражает среднее значение показателя гибкости. Если $T_н$ стремится к 0, то *Гб* стремится к 1, т.е. система приближается к абсолютной гибкости. Если $T_н$ становится очень большим по сравнению с T_p, то *Гб* стремится к 0, т.е. система становится «жесткой». В затраты времени на переналадку следует включать время на изготовление заменяемых при переналадке компонентов.

2.2.5 Критерии надежности

Под *надежностью* будем понимать способность изделия сохранять работоспособность (выполнять заданные функции) в определенных условиях эксплуатации. Потеря работоспособности ведет к частичному или полному *отказу*, который может быть *постепенным* или *внезапным*. Примером постепенного отказа является процесс изнашивания режущей части инструмента. Когда износ достигает определенного значения, инструмент нужно заменить, так как его режущие свойства недопустимо ухудшились. Примером внезапного отказа является поломка детали в связи с развитием в ней усталостных процессов (накопление невидимых внешне микроразрушений).

Надежность изделия (его компонента) характеризуется *долговечностью* и *ремонтопригодностью*. *Долговечность* – способность к длительной эксплуатации при необходимом техническом обслуживании, в которое могут входить различные виды ремонтов. *Ремонтопригодностью* называется ее приспособленность к предупреждению и устранению отказов. То есть ремонтопригодность характеризуется затратами труда и средств на ремонтные и восстановительные работы.

Поскольку обычно отказ является случайным событием, то характеристиками долговечности являются: 1) *среднее время безотказной*

Витебский государственный технологический университет

работы (или *наработка на отказ*) $T_{ср}$; 2) *дисперсия* $D(T)$ или *поле рассеяния* $\omega(T)$ времени безотказной работы T; 3) *коэффициент готовности* Kг – вероятность того, что в данный момент времени t система (ее элемент) находится в исправном (работоспособном) состоянии.

В данном контексте *элемент – это техническая система, надежность которой изучается вне зависимости от ее конфигурации*. Коэффициент готовности определяется по следующей формуле:

$$K\text{г} = \frac{T_{c\text{р}}}{T_{c\text{р}} + T_{c\text{в}}},$$

где $T_{св}$ – среднее время восстановления системы (элемента).

Если известны значения $K\text{г}_i$ для элементов системы, то в зависимости от вида связей элементов можно вычислить значение Kг для системы в целом. Возможны три принципиально различных типа связей (в смысле надежности), объединяющих элементы в систему (рис. 2.4). При последовательном соединении отказ любого из элементов системы приводит к отказу всей системы. Примером такой системы является автоматическая поточная линия без накопителей заготовок перед каждым станком. Коэффициент готовности такой системы из n-элементов (в случае независимости характеристик надежности ее элементов) определяется по формуле

$$K\text{г} = K\text{г}_1 \cdot K\text{г}_2 \cdot \ldots \cdot K\text{г}_{(n-1)} \cdot K\text{г}_n.$$

В случае наличия накопителей отказ любого станка линии (кроме последнего) не приводит к мгновенному отказу системы. Линия может еще работать в течение некоторого отрезка времени, пока не будет исчерпан запас заготовок в накопителях. Если в течение данного отрезка времени отказ вышедшего из строя станка будет ликвидирован, то в работе линии не будет перерывов. Такое мероприятие существенно повышает надежность линии.

При параллельном (в смысле надежности) соединении элементов отказ системы наступает, когда откажут все элементы, так как после отказа одного из них выполнение его функции берет на себя другой, и так до отказа последнего. Коэффициент готовности такой системы из n-элементов определяется по формуле

$$K\text{г} = 1 - (1 - K\text{г}_1) \cdot (1 - K\text{г}_2) \cdot \ldots \cdot (1 - K\text{г}_n).$$

Для таких систем чаще всего $K\text{г}_i = K\text{г}_1 = \text{Const}$. Тогда

$$K\text{г} = 1 - (1 - K\text{г}_1)^n.$$

Витебский государственный технологический университет

При последовательно-параллельном соединении элементов для вычисления коэффициента готовности системы последнюю делят на последовательно соединенные группы элементов, имеющих параллельные связи. Сначала определяются коэффициенты готовности групп, а затем всей системы в целом. Тогда для системы, схема которой показана на рисунке 2.4 в, коэффициент готовности определяется по формуле

$$Кг = Кг_1 \cdot Кг_3 \cdot Кг_5 \cdot (1 - (1 - Кг_2)^2) \cdot (1 - (1 - Кг_4)^2).$$

А для системы, схема которой показана на рисунке 2.4 г:

$$Кг = Кг_1 \cdot Кг_4 \cdot Кг_5 \cdot (1 - (1 - (Кг_2 \cdot Кг_3)^2).$$

Если коэффициенты готовности всех пяти элементов одинаковы и равны 0,9, то для систем, схемы которых показаны на рисунке 2.4, коэффициенты готовности будут соответственно равны: а) – 0,5905; б) – 0,9999; в) – 0,7145; г) – 0,7027. Из данных расчетов следует, что введение двух резервных станков в линию повышает ее коэффициент готовности и в несколько большей степени для такого соединения, когда резервные станки не соединяются последовательно между собой.

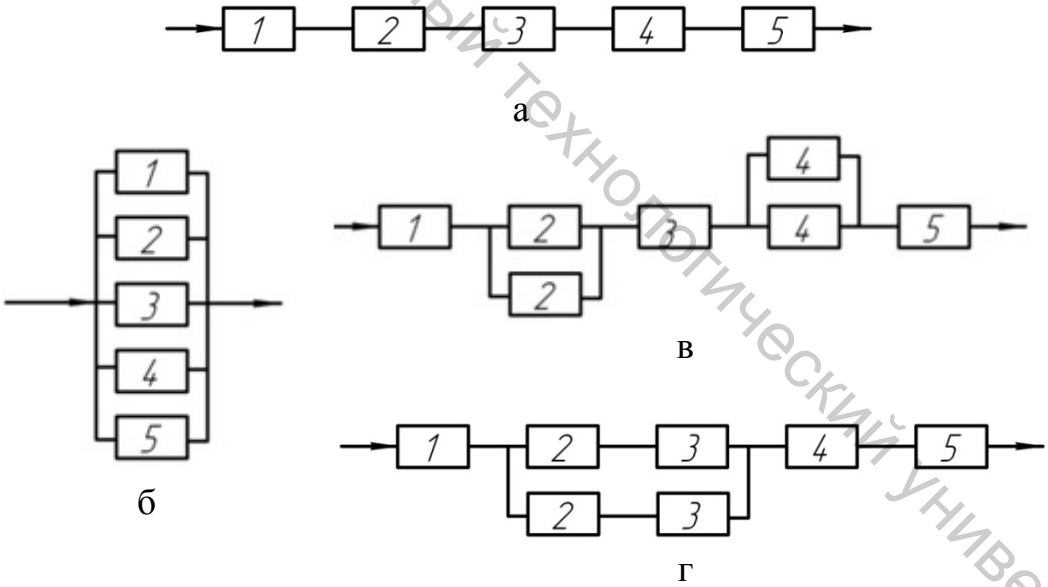


Рисунок 2.4 – Варианты связи компонентов системы по надежности:
а – последовательное, б – параллельное,
в, г – последовательно-параллельное

Критерий ремонтопригодности *К*рм вычисляется по формуле

$$Крм = Зрм / Ц,$$

Витебский государственный технологический университет

где *З*рм – затраты на ремонты за период жизни системы; Ц – цена системы. В качестве критерия ремонтопригодности можно использовать показатель $T_{св}$.

2.2.6 Критерий сложности устройства

На промежуточных этапах проектирования нет возможности (нет данных и времени для расчетов) определить капитальные затраты на реализацию варианта технической системы. В первом приближении этот критерий можно заменить *показателем* (критерием) *сложности* (Сл), так как затраты на изготовление и отладку системы зависят от ее сложности.

Лучше всего организовать вычисление критерия сложности устройства иерархически. На самом низком уровне иерархии декомпозиции любого устройства находятся типовые поверхности. Для вычисления показателя сложности типовой поверхности ($Сл_п$) предлагается следующая классификация.

Все типовые поверхности делятся на *шесть классов, а каждый* класс делится на подклассы поверхностей:

а) вращения (*цилиндр*, *конус*, *канавка*);

б) плоские (*плоскость*, *окно*, *канавка*);

в) винтовые (*резьба цилиндрическая*, *резьба коническая*, *резьба ходовая*, *червяк*);

г) зубчатые (*цилиндрический венец*, *конический венец*, *шлицы*);

д) фасонные (*плоско-фасонная*, *объемно-фасонная*);

е) типовые сочетания поверхностей стандартных деталей (*сочетания поверхностей крепежных деталей*, *сочетание поверхностей пружины*, *сочетание поверхностей шарикового (роликового) подшипника*).

Каждому двузначному коду соответствует *весовой коэффициент* $Вк_{ij}$, где i – номер класса; j – номер подкласса. Чем сложнее для обработки поверхность, тем больше ее весовой коэффициент. Значения этих весовых коэффициентов приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Весовые коэффициенты сложности поверхности

i, j	1,1	1,2	1,3	2,1	2,2	2,3	3,1	3,2	3,3
$Вк_{ij}$	1	1,2	0,5	2	2,6	2,1	2,5	3	4,3
i, j	3,4	4,1	4,2	4,3	5,1	5,2	6,1	6,2	6,3
$Вк_{ij}$	5,1	7,2	9,1	7,5	5,5	10	1,5	0,8	9,2

Показатель сложности u-й типовой поверхности $Сл_{пu}$ предлагается определять по формуле

Витебский государственный технологический университет

$$Сл_{пu} = \frac{G_{1u} \cdot G_{2u} \cdot Вк_{iju}}{Кв_u - 3},$$

где u – номер поверхности; G_{1u} и G_{2u} – коэффициенты, учитывающие вид и тип поверхности; $Кв_u$ – квалитет точности (от 14 до 5). Для открытых поверхностей $G_{1u} = 1$, для полуоткрытых – 1,2, для закрытых – 1,5. Для наружных поверхностей $G_{2u} = 1$, для внутренних – 1,5.

Показатель сложности v-й детали $Сл_{Дv}$ зависит от количества поверхностей $N_{пv}$, из которых она состоит:

$$Сл_{Дv} = \sum_{u=1}^{N_{пv}} .Сл_{пu} .$$

Показатель сложности крепежных деталей принимается равным показателю сложности поверхности шестого класса.

При определении показателя сложности q-й сборочной единицы $Сл_{Сq}$ необходимо учитывать не только количество деталей $N_{Дq}$ в ней, но и необходимые дополнительные работы при сборке: шабрение; притирка; шлифование; штифтование. Для каждой из этих работ назначаются соответствующие весовые коэффициенты $Вк_{qe}$, где e – код вида дополнительной работы. Эти весовые коэффициенты равны:

e	1	2	3	4
$Вк_{qe}$	4	2,3	1,5	2,5

Тогда показатель сложности сборочной единицы можно определить по формуле

$$Сл_{Сq} = \sum_{v=1}^{N_{ДД}} Сл_{Дv} + \sum_{e=1}^{N_{Pq}} Вк_{qe},$$

где N_{Pq} – количество дополнительных работ при сборке q-й сборочной единицы.

И наконец, показатель сложности устройства $Сл$, состоящего из N_C сборочных единиц, $N_{ДД}$ дополнительных деталей и $N_{ДС}$ дополнительных стандартных деталей (дополнительные детали не входят в сборочные единицы), можно оценить по формуле

$$Сл = \sum_{q=1}^{N_C} Сл_{Сq} + \sum_{r=1}^{N_{ДД}} Сл_{Дr} + \sum_{s=1}^{N_{ДД}} Вк_{Дs},$$

Витебский государственный технологический университет

где $Сл_{Дr}$ – показатель сложности r-й дополнительной детали; $Вк_{Дs}$ – весовой коэффициент s-й дополнительной стандартной детали.

2.2.7 Экономические критерии

Экономические критерии качества четко оценивают целесообразность использования технологических машин и технологических процессов. Одним из таких критериев является *индекс эффективности затрат* (*Иэ*), который определяется по формуле

$$Иэ = \frac{Ц - С}{К},$$

где *К* – капитальные затраты на приобретение, монтаж и наладку технологической машины (на подготовку технологического процесса); *Ц* – цена годового выпуска производимой с помощью приобретенной машины (технологического процесса) продукции; *С* – себестоимость годового выпуска продукции.

Вторым экономическим критерием качества является *срок окупаемости* затрат (*ТО*), то есть отрезок времени, в течение которого суммарная прибыль станет равной капитальным затратам.

$$ТО = \frac{1}{Иэ}.$$

Однако в рыночных условиях цена определяется не только затратами на производство, но и отношением спроса к предложению. Поэтому эти критерии являются приближенными. В некоторых случаях (при сравнении двух вариантов технологических машин или процессов) более объективным является экономический *критерий приведенных затрат* (*ПЗ*), которые отражают только отличающиеся виды затрат в рассматриваемых вариантах. Приведенные затраты определяются по формуле

$$ПЗ = Сп + Иэн \cdot К,$$

где *Сп* – приведенная годовая себестоимость выпускаемых товаров и услуг; *Иэн* – нормативный индекс эффективности затрат (в машиностроении составляет от 0,125 до 0,2); *К* – капитальные затраты на реализацию варианта.

Витебский государственный технологический университет

Выбирается тот вариант, у которого *ПЗ* меньше. Если проектируемый вариант системы сравнивается с действующим (базовым), то знание приведенных затрат позволяет определить *годовой экономический эффект* (*Эг*) от внедрения (использования) спроектированного варианта. Экономический эффект определяется по формуле

$$Эг = ПЗ_б - ПЗ_П ,$$

где $ПЗ_б$ и $ПЗ_п$ – приведенные затраты соответственно базового и проектируемого вариантов системы.

Важнейшим критерием оценки экономической эффективности является *производительность общественного труда* $Q_{об}$, которая представляет собой количество продукции, выпущенной на один рубль суммарных трудовых затрат. Для ее определения необходимо общее количество продукции, выпущенное за определенный период времени *T*, разделить на суммарные затраты прошлого и живого труда в денежном выражении.

$$Q_{об} = \frac{N_г \cdot T}{W_к + T \cdot (W_т + W_ж)},$$

где $N_г$ – годовой выпуск продукции, шт.; $W_к$ – капитальные затраты на приобретение и монтаж системы; $W_т$ – годовые текущие затраты прошлого труда, необходимые для обеспечения работоспособности системы (стоимость инструмента и электроэнергии, ремонт и обслуживание и т.д.); $W_ж$ – годовые затраты живого труда на обслуживание системы (зарплата операторов, наладчиков и т.д.). Данное выражение можно переписать следующим образом:

$$Q_{об} = \frac{T}{(W_ж / N_г) \cdot (K_{то} + T \cdot (m+1))},$$

где $K_{то} = W_к / W_ж$ – коэффициент технической оснащенности; $m = W_т / W_ж$ – коэффициент текущих затрат; $W_ж / N_г = C$ – затраты живого труда на единицу продукции.

Эта формула показывает, что кроме обслуживающего персонала работу системы обеспечило некоторое количество человек, создав средства производства, а в течение срока эксплуатации системы труд (в среднем) еще m человек обеспечивает систему всем необходимым для выпуска продукции. Производительность общественного труда не является постоянной величиной, а изменяется от времени, как это показано

Витебский государственный технологический университет

на рисунке 2.5, где величина (1/*a*), равная [1/($K_{то}\cdot C$)], характеризует начальный (при T = 0) темп повышения производительности общественного труда, а величина *b*, равная $C\cdot$(m+1), характеризует суммарные затраты живого и овеществленного труда на единицу выпускаемой продукции.

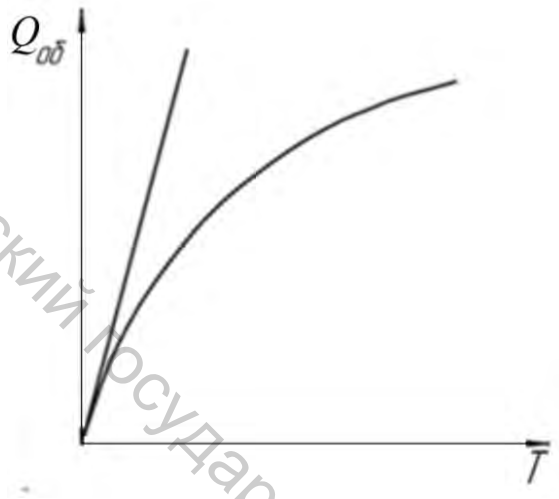


Рисунок 2.5 – Зависимость производительности общественного труда от времени эксплуатации технической системы

Два варианта систем при выборе наиболее эффективной можно сравнивать в одной из следующих ситуаций: *сравниваются два варианта проектируемых или приобретаемых систем*; *вариант проектируемой или приобретаемой системы сравнивается с заменяемой, которая уже проработала* R *лет*.

Одну из систем (первую или заменяемую) будем считать базовой. Зная характеристики исходного варианта технической системы $K_{то}$, *m*, *C* и предполагаемый срок службы *T*, можно сравнивать варианты. В первой ситуации возможны два случая изменения производительности общественного труда во времени (рис. 2.6). В первом случае вторая (*а*) система всегда эффективнее первой. А во втором (*б*) – относительная эффективность зависит от времени. При $T < T_o$ эффективнее первая, а при $T > T_o$ – вторая.

Первый вариант имеет место, если $a_1 > a_2$ и $b_1 > b_2$. А второй вариант – при $a_1 < a_2$ и $b_1 > b_2$. Значение T_o можно определить из уравнения

$$T_o = (a_2 - a_1)/(b_1 - b_2).$$

Подставляя значения показателей эффективности в формулу для вычисления $Q_{об}$, получим выражение для сравнения двух конкурирующих систем

$$q = \frac{Q_{об2}}{Q_{об1}} = \frac{a_1 + b_1 \cdot T}{a_2 + b_2 \cdot T},$$

где *q* – относительная производительность общественного труда.

Витебский государственный технологический университет

Если предполагаемый срок службы близок к $T_о$, то между конкурирующими системами нет существенной разницы.

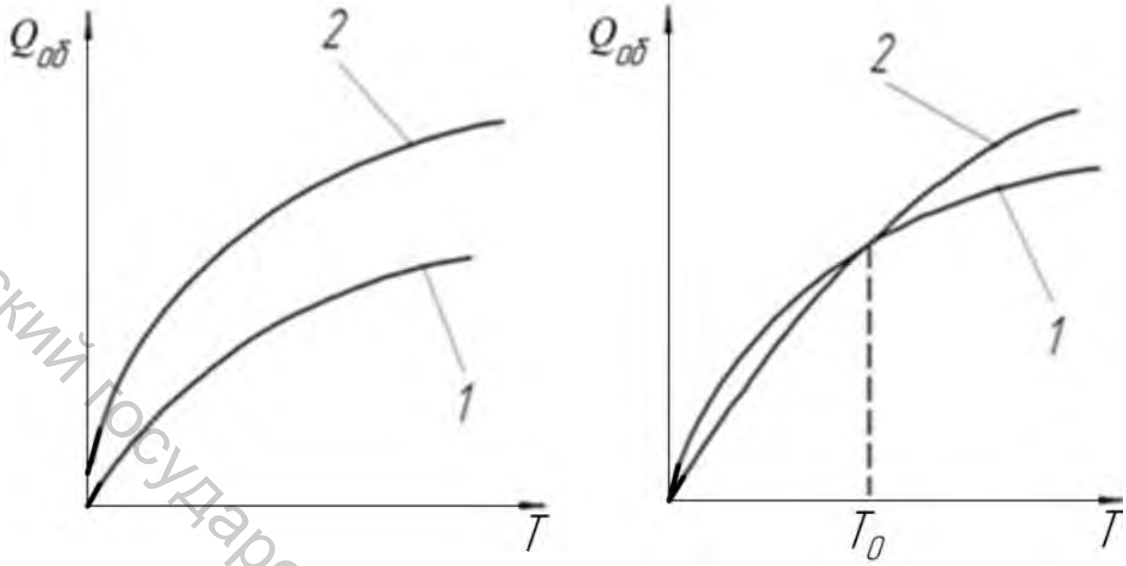


Рисунок 2.6 – Зависимость производительности общественного труда от времени для двух конкурирующих технических систем:
1 – базовой; 2 – новой

При замене системы, проработавшей уже R лет, новой с соответствующими показателями эффективности (рис. 2.7) относительная производительность общественного труда определяется следующим выражением

$$q = \frac{Q_{об2}}{Q_{об1}} = \frac{T}{T+R} \cdot \frac{a_1 + b_1 \cdot (T+R)}{a_2 + b_2 \cdot T}.$$

Время $T_о$, через которое новая система обеспечит более высокую, чем заменяемая, производительность общественного труда (рис. 2.7) определяется при решении следующего квадратного уравнения:

$$A \cdot T_o^2 + B \cdot T_o - D = 0;$$

где $A = (b_1 - b_2)$; $B = (a_1 - a_2) + A \cdot R$; $D = a_2 \cdot R$.

Витебский государственный технологический университет

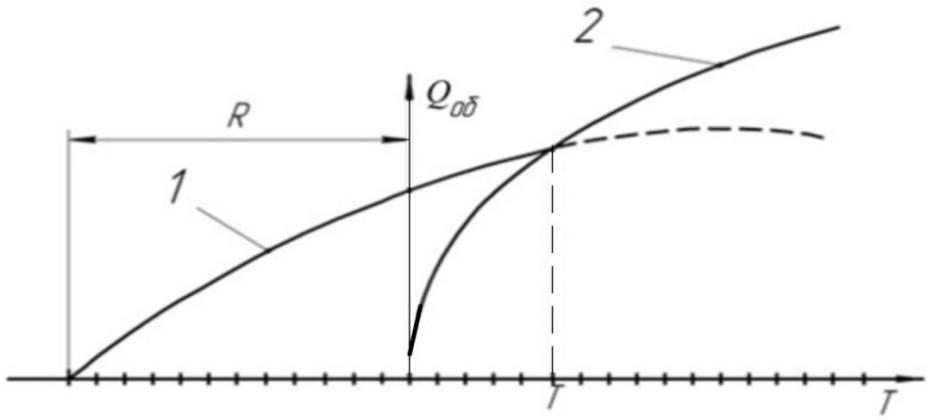


Рисунок 2.7 – Зависимость производительности общественного труда от времени при замене базовой системы *1*, проработавшей *R* лет, новой *2*, более производительной

2.2.8 Эргономический критерий

Одним из эргономических критериев качества является ***критерий безопасности*** (*Кб*), который отражает вредное влияние сырья, продукции, выпускаемой системой, отходов производства и самой системы на человека (оператора) и окружающую среду. Значение Кб определяется по формуле

$$Кб = \sum_{i=1}^{n} \frac{B_i \cdot V_i \cdot S_i}{S_{i.}},$$

где n – число вредных и опасных факторов; B_i – весовой коэффициент i-го фактора, который выбирается в соответствии с градацией по тяжести вредных воздействий (легкие и тяжелые травмы, смерть); при этом сумма B_i должна быть равной 1; V_i – весовой коэффициент i-го фактора, который принимает одно из следующих значений: $V_i = 1$ при $S_i = S_{i.н}$; $V_i = 1 / B_{min}$ в противном случае; S_i – значение i-го вредного или опасного фактора (вероятность травмы, вибрационная нагрузка, уровень радиации, удельное содержание вредных веществ и т.д.); $S_{i.н}$ – нормативное значение i-го фактора (если $S_{i.н} > 0$, то необходимо, чтобы у проектируемой системы $S_i \le S_{i.н}$).

Для определения S_i необходимы специальные исследования, и поэтому на этапе проектирования их определить невозможно. Это можно осуществить после изготовления опытного образца. Если $S_i \le S_{i.н}$, то $0 \le Кб \le 1$. Чем меньше *Кб*, тем лучше.

Витебский государственный технологический университет

2.2.9 Методы определения показателей качества

Метод определения единичных показателей качества машины зависит от ее конструктивных и технологических особенностей. В машиностроении применяют описанные ниже методы определения показателей [1, 7].

Измерительный метод осуществляется на основе технических средств измерений и контроля, базируется на информации, получаемой с использованием этих средств. С помощью измерительного метода определяют значения таких показателей качества, как масса изделия, сила тока, скорость автомобиля, частота вращения двигателя и др.

Регистрационный метод осуществляется на основе наблюдения и подсчета числа определенных событий, предметов или затрат, например, подсчета отказов изделия при испытаниях, числа дефектных изделий в партии и др.

Расчетный метод осуществляется на основе использования теоретических и (или) эмпирических зависимостей показателей качества машины от ее параметров. Применяется в основном при проектировании продукции. Позволяет также установить зависимости между отдельными показателями качества. Служит для определения массы изделия, показателей его производительности, например, определения производительности металлорежущего станка по скорости и глубине резания, а также по подаче и др.

Органолептический метод осуществляется на основе анализа восприятий органов чувств, например, при контроле окраски машины, при проверке отсутствия рисок и царапин или других дефектов на обработанной поверхности детали. При его реализации возможно использование технических средств (лупа, микроскоп и т.п.), повышающих восприимчивость и разрешающие способности органов чувств.

Экспертный метод осуществляется на основе решения, принимаемого экспертами, например, при оценке эстетической характеристики машины или прибора.

Социологический метод осуществляется на основе сбора и анализа мнений фактических или возможных потребителей продукции, например, при оценке качества выпущенной серии электродвигателей, телевизоров и т.д.

При оценке качества любого изделия применяют обычно в сочетании несколько рассмотренных методов. Они служат для оценки не только уровня качества продукции, но также для технического контроля в ее производстве.

При оценке показателей качества продукции *по балльной системе* можно использовать, например, четыре балла: 5 («отлично»), 4 («хоро-

Витебский государственный технологический университет

шо»), 3 («удовлетворительно») и 0 («плохо»). Возможны и другие балльные системы.

Баллы присваивают изделию, качество которого нужно оценить, и аналогу. Относительным единичным показателем качества в случае балльной оценки является отношение баллов оцениваемого изделия к баллам аналога.

Балльный метод оценки показателей качества на практике часто применяют в сочетании с *экспертным методом*. Экспертный метод оценки качества продукции осуществляется экспертной группой, состоящей из высококвалифицированных специалистов примерно одинаковой степени компетентности. Экспертов должно быть не менее семи человек (при меньшем их числе велика вероятность принятия группой случайных решений).

При голосовании решение принимается только в том случае, если за него подано не менее 2/3 голосов членов экспертной группы. Для улучшения степени объективности оценок опрос экспертов должен производиться в следующем порядке. Сначала оценки проставляются экспертами независимо друг от друга; затем после короткого публичного обоснования выставленных оценок проводится второй тур голосования, в ходе которого эксперты вновь, независимо друг от друга, устанавливают новые оценки. Желательно проводить два-три тура проставления оценок.

Показатель качества продукции определяют как среднее арифметическое значений оценок, проставленных каждым экспертом:

$$\bar{P}_j = \sum_{j=1}^{N} \bar{p}_j / N,$$

где $\bar{P}_j$ – значение показателя качества, проставленное j-м экспертом; N – число экспертов.

Окончательное значение показателя качества определяют как среднее арифметическое значение оценок, полученных в каждом туре опроса экспертов:

$$\bar{P}_i = \sum_{i=1}^{m} \bar{p}_i / m,$$

где $\bar{P}_i$ – значение показателя качества, проставленное в каждом туре; m – число туров опроса.

Комплексный метод оценки качества применяют, когда представляется возможным определить функциональную взаимосвязь комплексного показателя качества и единичных показателей. Комплексный показатель может быть выражен *главным показателем*, отражающим назначение системы, *интегральным* и *средневзвешенным* показателями.

Витебский государственный технологический университет

Комплексные показатели характеризуют качество машины по совокупности ее нескольких простых свойств или одному сложному свойству, состоящему из нескольких простых. Их часто определяют методом среднего взвешенного (арифметического, геометрического и т.д.).

Примером комплексного показателя, определенного методом среднего взвешенного (арифметического), может служить показатель

$$q_k = \sum_{i=1}^{n} q_i c_i,$$

где q_i – показатель 1-го свойства оцениваемой продукции; c_i – коэффициент весомости показателя q_i.

В случае большого разброса значений q_i рекомендуется другая формула (среднего взвешенного геометрического):

$$q_k = \prod_{i=1}^{n} q_i^{c_i}.$$

Определяющим называют показатель, по которому оценивают качество продукции. Определяется он по приведенным выше формулам, но при этом q_i характеризует q_k средние результаты оценки i-го свойства (оценка, как правило, дается экспертами с помощью балльного метода). В том случае, когда определяющий показатель является комплексным, он называется обобщенным. Если хотя бы один единичный показатель неудовлетворительный, то обобщенный показатель следует принимать равным нулю, т.е. качество оценивается как неудовлетворительное.

Интегральным $P_{\text{ИН}}$ называется комплексный показатель, характеризующий эффективность машины. *Интегральный показатель* применяют в том случае, когда установлена *функциональная зависимость* суммарного полезного эффекта P эксплуатации системы от суммарных затрат на ее создание и эксплуатацию. При отсутствии функциональной зависимости главного показателя определяют его средневзвешенное значение, т.е. среднеарифметическое или среднегеометрическое значение.

Интегральный показатель может быть рассчитан следующим образом: либо как отношение суммарного полезного эффекта (в натуральном выражении) от эксплуатации машины к затратам на ее создание и работу за весь срок службы:

$$P_{\text{ин}} = W/(K_0 + S).$$

Витебский государственный технологический университет

Либо как обратное отношение этих затрат к полезному эффекту:

$$P_{\text{ин}} = (K_0 + S)/W,$$

где W – количество единиц продукции или выполненной машиной работы за весь срок ее эксплуатации, например, число произведенных заготовок, деталей, тонн или килограммов продукции и т.д.; K_0 – начальные капиталовложения в машину, включающие ее оптовую цену, доставку, монтаж и наладку; S – эксплуатационные расходы на весь срок службы машины, включая расходы на ее ремонт и обслуживание.

В первом случае интегральный показатель определяется работой, приходящейся на 1 руб. суммарных затрат; во втором – суммой этих затрат в рублях, приходящихся на единицу работы.

Приведенные формулы пригодны для определения интегрального показателя изделий со сроком службы до одного года. При больших сроках службы необходимо внести поправку в сумму капитальных расходов, учитывающих фактор времени (поскольку эти расходы производятся одновременно).

С помощью этой поправки капитальные расходы приводятся к начальному моменту приобретения или изготовления машины. При одинаковых годовых эксплуатационных расходах S в течение T лет значение интегрального показателя рассчитывается по формуле

$$P_{\text{ин}} = \frac{W}{K_0(1+E_H)^T + S},$$

где $E_{\text{н}}$ – нормативный коэффициент эффективности, принимают $E_{\text{н}} = 0{,}20$.

Качество сборочных единиц практически характеризуется перечисленными показателями в соответствии со своим функциональным назначением.

Смешанный метод оценки качества основан на совместном применении дифференциального и комплексного методов. Его применяют в случаях, когда совокупность единичных показателей качества является достаточно обширной и анализ значений показателей дифференциальным методом не позволяет получить необходимых обобщающих выводов и когда обобщенный показатель качества в комплексном методе недостаточно полно учитывает все существенные свойства системы и не позволяет получить выводов с учетом всех важнейших свойств. При использовании смешанного метода часть единичных показателей объединяется в группы, для каждой из которых определяют соответствующий комплексный показатель.

Витебский государственный технологический университет

2.3 Характеристики качества деталей машин
2.3.1 Эксплуатационные свойства деталей

Безотказность и долговечность исполнения своих функций изделием машиностроения определяется рядом эксплуатационных свойств деталей и их соединений: статической и усталостной прочностью, поверхностной контактной статической и динамической прочностью, коррозионной стойкостью, контактной жесткостью, герметичностью, износостойкостью, прочностью посадок и др. Все эти эксплуатационные свойства в значительной мере зависят от качества поверхностного слоя деталей, так как все разрушения (статические, усталостные, контактные, коррозионные и др.) начинаются с поверхности [7–18].

Под *статической и усталостной прочностью деталей* понимают их способность сопротивляться разрушению при воздействии соответственно статической и динамической нагрузки.

Качество поверхностного слоя оказывает влияние на статическую и усталостную прочность деталей через коэффициент концентрации напряжений, который рассчитывается по формуле

$$\alpha_0 = 1 + \frac{0{,}2}{tm\,Sm}[2\gamma Rmax(Rmax - Rp)]^{0{,}5},$$

где tm – относительная длина опорной линии профиля шероховатости на уровне средней линии, %; Sm – средний шаг неровностей профиля шероховатости, мм; y – коэффициент, учитывающий влияние поверхностных остаточных напряжений на прочность детали

$$\gamma = \frac{\sigma_{-1}}{\sigma - \sigma_{\text{ост}}},$$

где σ_{-1} – предел прочности материала детали; $\sigma_{\text{ост}}$ – поверхностные остаточные напряжения; σ – напряжение от нагрузки; R_{max} – максимальная высота профиля шероховатости, мкм; R_p – высота сглаживания профиля шероховатости (расстояние от линии выступа до средней линии), мкм.

Поверхностная контактная статическая и динамическая прочность определяется способностью поверхностного слоя детали сопротивляться разрушению при контакте с другой деталью под воздействием соответственно статических и динамических нагрузок.

При статической нагрузке начало поверхностных контактных разрушений определяется ее величиной, которая рассчитывается по формуле

Витебский государственный технологический университет

$$P_{max} = \frac{1{,}34 m v_0^2}{\gamma_{пл}},$$

где m – масса контактирующей детали; v_0 – скорость приложения нагрузки; $y_{пл}$ – пластические контактные деформации детали.

При действии статической (P_{CT}) и динамической ($P_д$) нагрузок контактные разрушения определяются величиной накапливаемой контактной деформации, которая определяется по формуле

$$\gamma_t = \left[\frac{2\pi(P_{ст}+P_д)R_a W z H_{max}}{A H_{\mu_0}}\right]^{1/3} \left(\frac{t}{t_{HB}}\right)^{m_1/3},$$

где Ra – среднее арифметическое отклонение профиля шероховатости; Wz – средняя высота волн; H_{max} – максимальное макроотклонение; A – геометрическая площадь контакта; H_{μ_0} – поверхностная микротвердость; t – время действия сил; t_{HB} – время испытания на твердость по Бринеллю; m_1 – показатель роста деформаций при действии динамической нагрузки; μ – коэффициент Пуассона.

Под *коррозионной стойкостью деталей* понимают способность поверхностных слоев сопротивляться разрушению под действием внешней среды. Скорость коррозии поверхностного слоя рассчитывается по формуле

$$v_k = v_{k_0}(1{,}1U_H^4 + 4U_H^3 - 4{,}1U_H^2)\left(28 \cdot 10^6 \frac{(Rmax - Rp)}{tm^2 Sm^2}\right)^{2/3},$$

где $V_{к0}$ – скорость коррозии материала детали; U_H – степень наклепа поверхностного слоя (U_H = 1,00 ... 1,75).

Контактная жесткость определяет способность слоев деталей, находящихся в контакте, сопротивляться действию сил, стремящихся их деформировать

$$j = \frac{p}{y_k},$$

где p – давление на площадь контакта, определяемое ее геометрическими размерами; $y_к$ – контактные перемещения (деформации).

Контактные перемещения составляют значительную часть в балансе упругих перемещений машин и сборочных единиц. Например, в суппортах токарных станков контактные деформации составляют 80–90 % общих перемещений, в одностоечных координатно-расточных и вертикально-фрезерных станках – до 70 %, в двухстоечных карусельных станках – до 40 % и т.д.

Витебский государственный технологический университет

Контактная жесткость сказывается на точности работы приборов, на точности обработки и сборки, т.е. на качестве машиностроительных изделий. Так, значение нормальных контактных сближений двух деталей при первом приложении нагрузки может быть рассчитано по формуле

$$y_k = (y_{\text{пл}1} + y_{\text{пл}2}) + (y_{\text{уп}1} + y_{\text{уп}2}),$$

где $y_{\text{пл}1}$, $y_{\text{пл}2}$ – пластические контактные деформации соответственно первой и второй контактирующих деталей при первом приложении нагрузки; $y_{\text{пл}1}$, $y_{\text{пл}2}$ – упругие контактные деформации соответственно первой и второй контактирующих деталей.

В общем случае при действии силы P эти составляющие контактных деформаций можно рассчитать по формулам:

$$y_{\text{пл}} = \pi \left(\frac{2\pi PRaWzH_{max}}{AH_{\mu_0}} \right)^{1/3},$$

$$y_{\text{пл}} = 2\pi \frac{1-\mu^2}{E} H_{\mu_0} Sm \frac{y_{\text{пл}}}{Ra},$$

где E – модуль упругости материала.

При повторных нагрузках (без их увеличения) контактные перемещения определяются упругими деформациями.

Контактные сближения деталей при скольжении можно рассчитать по формуле

$$y_{\text{ск}} = y_{\text{к}} \left(2\sqrt{1 + f^2 - 1} \right),$$

где f – коэффициент трения скольжения.

Касательные контактные деформации рассчитывают по формуле

$$x_{\text{к}} = \frac{\pi Sm}{16Rp^2} \left[1 - \left(1 - \frac{P_k}{f_p} \right)^{2/3} \right] (y_{\text{ск}}^2 - y_{\text{к}}^2),$$

где $P_к$ – касательные нагрузки; f – коэффициент трения покоя.

Герметичность соединений определяет их способность удерживать утечку газа или жидкости. С учетом геометрии и контактных деформаций сопрягаемых поверхностей величина утечки в общем случае может быть определена по формуле

Витебский государственный технологический университет

$$Q = k\frac{\pi d\Delta p u\left[0{,}5\left(H_{max1}+H_{max2}+W_{z_1}+W_{z_2}\right)+R_{p_1}+R_{p_2}-y_к\right]^3}{\mu' l},$$

где k – коэффициент формы контакта, в частности, для кольцевой А = 0,0066; d и l – размеры соединения; Δp – перепад давления; u = 0,2 ... 0,22 – константа Кармана; μ' – динамический коэффициент вязкости газа или жидкости; H_{max1} и H_{max2} – макроотклонения сопрягаемых поверхностей; Wz_1 и Wz_2 – средняя высота волн сопрягаемых поверхностей; Rp_1 и Rp_2 – высота сглаживания профиля шероховатости сопрягаемых поверхностей; y_k – контактные деформации сопрягаемых поверхностей, определяемые по формулам контактной жесткости.

При работе пар трения происходит *изнашивание* (разрушение) поверхностных слоев, которое приводит к уменьшению размеров контактирующих деталей, т.е. их износу. Размерное изнашивание поверхностей трения характеризуется его интенсивностью, которую рассчитывают по формулам:

– в период приработки

$$I_h = \frac{1{,}2Ra^{2/3}}{n\lambda Smtm^{3/2}}\left(\frac{p}{H_{\mu_0}}\right)^{7/6}\sqrt{15\pi(2\pi WzH_{max})^{1/3}\left[1+\frac{2\pi H_{\mu_0}(1-\mu^2)}{E}\right]},$$

– в период нормального изнашивания

$$I_h = \frac{1{,}2\pi p^{2/3}}{n\lambda tm^{3/2}H_{\mu_0}^{2/3}}\sqrt{\frac{30(1-\mu^2)(2\pi RaWzH_{max})^{1/3}}{ESm}},$$

где n – число циклов воздействия, которое приводит к разрушению материала; p – номинальное давление на поверхности трения; X – коэффициент, учитывающий влияние поверхностных остаточных напряжений на изнашивание

$$\lambda = \left[\frac{\sigma-\sigma_0}{\sigma_a}\right]^{t_y},$$

где σ_a – действующее значение амплитудного напряжения в поверхностном слое; t_y – параметр фрикционной усталости материала детали.

Под *прочностью посадок с натягом* понимают их способность передавать крутящий момент ($M_{кр}$) и осевые нагрузки (P) без взаимного проскальзывания сопрягаемых деталей. Формулы для расчета прочности посадок с натягом с учетом качества сопрягаемых поверхностей имеют следующий вид:

Витебский государственный технологический университет

$$M_{\text{кр}} = \frac{\pi d^2 l f_{\text{кр}}[\Delta - 0{,}5(H_{max1} + H_{max2} + Wz_1 + Wz_2) - Rp_1 - Rp_2]}{2 \cdot 10^3 \left[\frac{\left(\frac{D^2+d^2}{D^2-d^2}\right)+\mu_1}{E_1} + \frac{1-\mu_2^2}{E_2}\right]},$$

$$P = \frac{\pi d l f_{oc}[\Delta - 0{,}5(H_{max1} + H_{max2} + Wz_1 + Wz_2) - Rp_1 - Rp_2]}{2 \cdot 10^3 \left[\frac{\left(\frac{D^2+d^2}{D^2-d^2}\right)+\mu_1}{E_1} + \frac{1-\mu_2^2}{E_2}\right]},$$

где d *и* l – диаметр и длина сопряжения; D – наружный диаметр сопрягаемой втулки; $f_{\text{кр}}$ и $f_{\text{ос}}$ – коэффициенты трения при кручении и осевом перемещении сопрягаемых поверхностей, зависящие от материалов деталей и метода сборки.

Таким образом, выполнение функционального назначения изделиями машиностроения в значительной мере определяется их качеством.

2.3.2 Свойства материалов

Качество деталей машин характеризуется свойствами материалов, размерами, точностью и качеством поверхностных слоев. *Свойства материалов* разделяют на *механические, технологические, физические, структурные и эксплуатационные* (или служебные) [7–18].

Механические свойства определяются поведением материалов под действием приложенных внешних механических сил. К механическим свойствам обычно относят сопротивление материалов деформированию (прочность, твердость) и сопротивление разрушению (пластичность, вязкость, способность не разрушаться при наличии трещин).

Основные *механические свойства* определяются при испытаниях на растяжение, ударный изгиб, сжатие, кручение и твердость.

При испытаниях на растяжение определяют временное сопротивление (предел прочности при растяжении) $\sigma_в$, предел текучести физический $\sigma_т$ или условный σ_{02}, предел пропорциональности $\sigma_{пц}$, предел упругости $\sigma_{0,05}$, относительное удлинение образца после разрыва δ_5 или δ_{10}, относительное сужение ψ, модуль продольной упругости (модуль Юнга) E. Характеристики $\sigma_в$, $\sigma_т$, σ_{02}, $\sigma_{пц}$, $\sigma_{0,05}$, а также модуль Юнга E измеряются в МПа, характеристики пластичности δ и ψ – в %.

Основной характеристикой *ударного изгиба* является *ударная вязкость КС* с различной формой надреза на образце (*KCU*, *KCV* или *KCT*), измеряемая в Дж/см^2 или в кДж/м^2.

Витебский государственный технологический университет

Наиболее важными характеристиками, определяемыми при других методах испытаний, являются *предел выносливости* в МПа, *условный предел ползучести*, например $\sigma_{0,2/100}^{700}$ в МПа (напряжение, которое за время испытания 100 ч при температуре 700 °С вызывает удлинение образца на 0,2 %), *предел прочности при сжатии* σ_a в МПа, *прочностные характеристики при кручении* (условий предел прочности $\tau_{пч}$, истинный предел прочности $\tau_к$, предел пропорциональности $\tau_{пц}$, предел упругости $\tau_{уп}$, условный предел текучести $\tau_{0,3}$) в МПа, *сдвиг при кручении* (скручивание) γ в %, *модуль упругости* при сдвиге кручением G в МПа, а также *модуль сжатия К* в МПа и *коэффициент Пуассона* ϑ (безразмерная величина).

Твердость Н (безразмерная величина) определяют методами Бринелля (HB), Роквелла (HRCэ, HRB, HRA), Виккерса (HV). Твердость в МПа тонких слоев оценивают по микротвердости с разной формой отпечатка.

Для полимерных материалов характерны некоторые особые свойства. При испытании полимеров на ползучесть определяют *показатель ползучести* β_t в %, *модуль ползучести* ε_t, в Н и *податливость*. Модуль ползучести характеризует относительное изменение удлинения образца при постоянных нагрузке и температуре в задаваемом временном интервале. Модуль ползучести вычисляют по формуле $\varepsilon_t = \sigma * \frac{100}{\sigma_t}$, где σ – напряжение при испытании, МПа; σ_t – относительная деформация в момент времени t, %. Податливость $П$т является величиной, обратной модулю ползучести ($П$т=1/ε_t), и измеряется в см^2/Н.

Технологические свойства – часть общих, присущих данному материалу физико-химических свойств, знание которых позволяет обоснованно проектировать и осуществлять технологический процесс и получать изделия с наилучшими, потенциально возможными для данного материала служебными свойствами. Технологические свойства проявляются в процессе получения отливок (литейные свойства), поковок и других деформируемых заготовок (деформируемость или технологическая пластичность), сварных конструкций (свариваемость), термообрабатываемых изделий (закаливаемость, прокаливаемость) и изделий, получаемых обработкой резанием (обрабатываемость резанием).

Жидкотекучесть – способность расплавленного металла заполнять полость литейной формы. Различают следующие разновидности жидкотекучести: *истинную*, определяемую при постоянном превышении температуры по сравнению с температурой нулевой жидкотекучести (ТНЖ); *практическую*, определяемую при постоянной температуре заливки; *условно-истинную*, определяемую при постоянном превышении температуры по сравнению с температурой ликвидуса (ТЛ). Разницу между ТЛ и ТНЖ называют *эффективным интервалом кристаллизации* ($\Delta t_{эф}$).

Витебский государственный технологический университет

В процессе кристаллизации сплавов происходит их усадка, т.е. уменьшение линейных размеров и объема отливки. Общая усадка распределяется между раковиной и порами. Максимум развития пористости фиксируется при составах сплавов вблизи точки C_p.

Технологическая пластичность характеризует способность материалов подвергаться обработке методами пластического деформирования. Количественно пластичность оценивают по характеристикам пластических свойств материалов (относительному удлинению и относительному сужению образцов), специальным характеристикам, определяемым при испытании на скручивание, развальцовку и т.д. Критерием высокой деформируемости сплавов является отношение $\sigma_{0.2}$ / $\sigma_в$. Например, для сталей высокой штампуемости $\sigma_{0.2}$ / $\sigma_в$= 0,50 ... 0,65.

Обрабатываемость сплавов резанием зависит от их химического состава и механических свойств (в частности, от твердости и прочности). Коэффициент обрабатываемости Kv = v/v$_э$, где v – скорость резания материала при заданных условиях обработки; v$_э$ – скорость резания материала-эталона при тех же условиях резания. Заданные условия обработки: толщина срезаемого слоя t=1,5 мм, подача s=0,2 мм/об, стойкость резцов – 60 мин, эталон – сталь 45 ($\sigma_в$=650 МПа, НВ 179). Все материалы в соответствии с их назначением и свойствами разбиты на группы, каждая из которых разделена на подгруппы.

Обрабатываемость резанием серого чугуна (СЧ) обратно пропорциональна его твердости. Она улучшается по мере увеличения количества феррита в структуре и повышения однородности структуры, при отсутствии в ней твердых включений фосфидной эвтектики и карбидов. При наличии графита стружка получается ломкой, и давление на инструмент уменьшается. При обработке высокопрочного чугуна (ВЧ) сила резания на 50...60 % выше, чем при обработке СЧ той же твердости, но при эквивалентных значениях $\sigma_в$ в обрабатываемость ВЧ лучше, чем СЧ. Обрабатываемость КЧ примерно такая же, как и ВЧ.

Свариваемость – свойство металлов и сплавов образовывать сварное неразъемное соединение, соответствующее качеству основного металла, подвергнутого сварке. По технологической свариваемости условно различают следующие группы стали: свариваемые без ограничений (без подогрева и термообработки); ограниченно свариваемые (предварительный подогрев, проковка швов, термообработка); трудносвариваемые (используется комплекс дополнительных операций); не применяемые для изготовления сварных конструкций.

Чугуны свариваются значительно хуже углеродистых сталей, поэтому газовая и дуговая сварка, а также и заварка дефектов (особенно крупных) на отливках выполняется по особой технологии.

Важной технологической характеристикой является способность сплава менять свои свойства при термической обработке. Для сталей используют две такие характеристики: *закаливаемость* и *прокаливае-*

Витебский государственный технологический университет

мость. Под *закаливаемостью* понимают способность стали повышать твердость в результате закалки. Закаливаемость стали определяется в первую очередь содержанием в ней углерода. Легирующие элементы в незначительной степени влияют на закаливаемость.

Под *прокаливаемостью* понимают способность стали образовывать закаленный слой с мартенситной или троостито-мартенситной структурой и высокой твердостью на определенную глубину.

Обычно прокаливаемость *П* (мм) характеризуют параметром прокаливаемости и критическим диаметром прокаливаемости. Параметр *П* прокаливаемости – это расстояние от торцовой охлаждаемой поверхности до зоны с полумартенситной структурой (50 % мартенсита и 50 % троостита), определяемое на стандартных образцах методом торцовой закалки. Параметр *П* зависит от химического состава стали.

К основным *физическим свойствам* материалов относятся плотность, теплофизические свойства (теплоемкость, теплопроводность, термическое расширение), электрические и магнитные свойства (электрическое сопротивление, магнитная проницаемость, коэрцитивная сила), хладноломкость и жаростойкость.

Химические свойства материалов определяют степень их химической активности или инертности по отношению к внешним средам и контактирующим телам. Важнейшая химическая характеристика материалов – их химический состав. От химического состава и строения материалов в первую очередь зависит их сопротивление внешним химическим воздействиям – их коррозионная стойкость. Химическая активность компонентов, входящих в состав материала, зависит от электронного строения атомов, положения элементов в ряду электроотрицательности, валентности и потенциалов ионизации атомов.

Структурные свойства определяются строением материалов. Различают макроструктуру, видимую невооруженным глазом или через лупу на изломах или на соответствующим образом подготовленных образцах (макрошлифах), и микроструктуру, видимую на микрошлифах при больших увеличениях с помощью оптических, рентгеновских или электронных микроскопов.

Эксплуатационные, или служебные, свойства материалов проявляются в процессе работы изделий при их взаимодействии с другими изделиями или внешней средой. Наиболее часто оценивают работоспособность материалов в условиях трения и изнашивания (коэффициент трения, износостойкость), повышенных и высоких температур (теплостойкость, ползучесть, жаропрочность, жаростойкость), а также в химически активных средах (коррозионная стойкость).

Витебский государственный технологический университет

2.3.3 Размеры деталей и их точность

Размеры деталей определяются исходя из их функционального назначения и действующих рабочих нагрузок [19–27].

Размеры деталей на рабочих чертежах по своему назначению могут быть разделены на группы.

Координирующие размеры используют для определения взаимного положения поверхностей деталей, а также осей. Это, как правило, размеры ответственных поверхностей, которые определяют служебное назначение детали. Например, у корпусных деталей ответственными являются плоские поверхности и отверстия для размещения валов, подшипников. Координирующие размеры увязывают плоские и цилиндрические поверхности корпуса.

Сборочные размеры используют для определения положения узлов относительно других элементов машины. Это, прежде всего, размеры присоединительных поверхностей. У корпусных деталей присоединительными чаще всего бывают плоские поверхности.

Кроме того, применяют технологические размеры, которые необходимы при изготовлении и контроле деталей.

Ни один размер, как и все остальные параметры качества деталей, нельзя получить абсолютно точно. Под точностью понимается степень приближения истинного значения параметра к его номинальному значению. Точность деталей машин характеризуется точностью размеров элементов деталей, т.е. отдельных поверхностей, и точностью относительного положения поверхностей.

Для того чтобы характеризовать точность размеров, их разделяют на номинальные, действительные и предельные. Относительно номинального размера определяют предельные размеры.

Номинальный размер определяет конструктор исходя из служебного назначения детали. Полученные расчетом размеры округляют до значений, соответствующих ближайшим достаточным значениям рядов предпочтительных чисел.

В реальном производстве нельзя абсолютно точно выполнить номинальный размер, а также измерить его без погрешности. Поэтому существует понятие «действительный размер» – это размер, измеренный с допустимой погрешностью.

Действительный размер для оценки качества продукции особо важен. В ходе изготовления детали в каждый момент времени этот размер имеет разные значения. Это объясняется тем, что используемые в машиностроении технологические системы вносят свои погрешности в изготовляемые детали, так как они работают в условиях постоянного изнашивания инструмента и, следовательно, постоянно изменяющихся силовых факторов, воспринимают действие нестационарного теплового

Витебский государственный технологический университет

поля, переменной жесткости систем. Кроме этого, на точность деталей оказывают влияние погрешности настройки инструмента, установки обрабатываемой заготовки и ряд других факторов.

Допуском называют разность между наибольшим и наименьшим допустимыми значениями параметра, в данном случае – размера. Допуски размеров регламентируются ГОСТом 25346. Изготовление деталей с соблюдением допусков способствует созданию высококачественной машины, несмотря на то, что каждая деталь ограничивается поверхностями, размеры и форма которых отличаются от номинальных [7, 19–28].

Метод выбора допусков размеров имеет принципиальное значение. Метод *аналогов* заключается в том, что конструктор отыскивает среди ранее сконструированных и находящихся в эксплуатации машин и узлов такие, в которых имеются детали, аналогичные конструируемым.

Развитием метода аналогов является *метод подобия*. Для назначения допусков этим методом отыскивают подобие конструктивных признаков и условий эксплуатации. Однако иногда бывает сложно установить собственно подобие, что ограничивает применение метода.

Наиболее обоснованным является *расчетный метод*. Пользуясь этим методом, назначают квалитеты (классы, степени точности) различных поверхностей деталей на основе физических явлений при эксплуатации, связанных чаще всего с контактированием деталей в собранной машине.

Каждая деталь характеризуется бесконечно большим числом размеров. Детали лишь на чертежах характеризуются номинальными (идеальными) поверхностями, а фактически ограничены реальными поверхностями. Детали всегда имеют отклонения формы. Обеспечение допустимого отклонения формы в производственных условиях всегда затруднено. В частности, в производственных условиях возникают отклонения от круглости. Они непосредственно сказываются на качестве соединений, имеющих цилиндрические поверхности потому, что по таким поверхностям устанавливают ответственные детали и узлы машин и, прежде всего, подшипники качения, которые вследствие отклонения формы колец могут утратить свои первоначальные характеристики.

Условия формообразования деталей настолько сложны, что одновременно возникает ряд отклонений: от цилиндричности, от перпендикулярности, от параллельности и др. Технологическое обеспечение допустимых параметров является одним из условий повышения качества машин. Так, у пары «вал – корпус» вал при поступательном движении не может перемещаться прямолинейно, если он имеет отклонения от цилиндричности или если такие отклонения имеют отверстие. Таким образом, отклонения параметров деталей в этом случае не обеспечива-

Витебский государственный технологический университет

ют заданного качества (например, не соблюдается форма траектории перемещения).

При решении проблемы качества деталей необходимо опираться на количественные показатели. На рисунке 2.8 утрированно представлена деталь типа двухступенчатого вала. В любом поперечном сечении размеры вала определяются переменным радиусом R, отсчитываемым от центра O номинального сечения диаметром $D_н$. Радиус R, именуемый текущим размером, зависит от угловой координаты φ. Текущий размер также меняется по координате z. Начальное значение радиуса оговаривается. Так, им может быть радиус R_1 с угловой координатой φ_1. Любой контур поперечного сечения удовлетворяет условию замкнутости, т.е. $f(\varphi) = f(\varphi + 2\pi)$.

Период функции равен 2π.

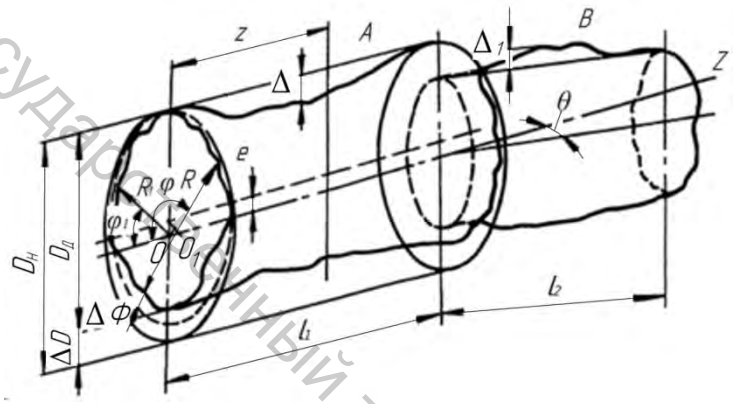


Рисунок 2.8 – Схема отклонения параметров двухстороннего вала

Реальный контур на левом торце вала ограничивается прилегающей окружностью (штриховая линия) диаметром $D_д$. Отклонение от круглости, характерное для каждого сечения, обозначено ΔФ. Для каждого сечения можно определить отклонение ΔD размера. Прилегающая окружность имеет центр в точке O_1. Поэтому действительный контур детали отличается от номинального (идеального), а их оси смещены на расстояние, равное эксцентриситету e. Можно убедиться, что ось действительного контура в общем виде не является прямой линией. Это характерно для любого сечения ступени вала A длиной l_1.

Для оценки качества детали ее форма имеет первостепенное значение. Отклонения и допуски формы оговорены ГОСТом 24642. Отклонения формы удобно описывать с помощью рядов Фурье. Зависимость $f(\varphi)$ погрешности действительного профиля от угла поворота рассматривается в полярной системе координат:

$$f(\varphi) = a_0/2 + \sum_{k=1}^{k=\infty}(a_k \cos k\varphi + b_k \sin k\varphi),$$

Витебский государственный технологический университет

где $a_0/2$ – нулевой член разложения; k – порядковый номер соответствующей гармоники; a_k, b_k – коэффициент ряда Фурье.

Вместо рядов для фактических целей удобно пользоваться тригонометрическим полиномом

$$f(\varphi) = c_0/2 + \sum_{k=1}^{k=n} c_k(\cos k\varphi + \varphi_k),$$

где n – порядковый номер высшей гармоники полинома.

Величина $c_0/2$ может быть принята за среднее значение функции $f(\varphi)$ в течение периода $T = 2\pi$ и определяется расстоянием от базового значения текущего размера до средней линии отклонений профиля. Поэтому значение $c_o/2$ представляет собой отклонение размера.

Первый член разложения $c_1 cos(\varphi + \varphi_1)$ характеризует расстоя-ние между центром вращения O_1 и геометрическим центром O, т.е. эксцентриситет e. Он указывает на отклонение расположения поверхности и выражает его количественно. Последующие члены полинома, начиная со второго, характеризуют спектр отклонений формы детали в поперечном сечении.

Второй член $c_2 cos(2\varphi + \varphi_2)$ характеризует овальность сечения, а третий член – $c_3 cos(3\varphi + \varphi_3)$ огранку с трехвершинным профилем и т.д. Поэтому сечение детали следует представлять очерченным контуром, имеющим отклонение размера с центром, смещенным от геометрического центра. Контур имеет овальную форму, на которую наложены огранки с различным числом вершин. Остальные члены ряда характеризуют соответствующие волнистость и шероховатость.

Приведенные рассуждения справедливы и для ступени B вала длиной l_2. Однако у этой ступени может оказаться своя ось, повернутая на угол θ в любой из плоскостей относительно оси z, а также могут возникнуть свои собственные погрешности. Отклонения профилей цилиндрических поверхностей целесообразно представлять и в продольных сечениях. Условие замкнутости контуров здесь не соблюдается.

Тригонометрический полином для описания продольного сечения можно применить, используя цилиндрическую систему координат (координатами являются R, φ, z). Условно принимаем, что период T=2l (где l – длина участка цилиндрической поверхности).

Полином

$$f(z) = c_0/2 + \sum_{k=1}^{k=p} c_k \sin(k\pi z)/2l,$$

где k – порядковый номер члена разложения.

Первый член разложения показывает, что при z = 0–$f(z)$ = 0, а при z = l–$f_l(z)$=c_1. Следовательно, этот член характеризует конусообразность, так как образующая профиля имеет соответствующий наклон. Второй член разложения $f_2(z) = c_2 \sin(\pi z)/l$ характеризует выпуклость

Витебский государственный технологический университет

контура, а при сдвиге фазы $f_2(z) = c_2 \sin(\pi z / l - \pi/2) = c_2 \cos \pi z / l$, т.е. он характеризует вогнутость контура. Так, на ступени A вала возникла седлообразность величиной Δ, а на ступени B – бочкообразность Δ_1.

Профиль детали в продольном направлении также представляет собой сложное сочетание конических поверхностей с наложенными на них седлообразными, бочкообразными, волнистыми профилями.

Отклонения профилей деталей определяют с помощью соответствующих анализаторов. Описание профилей оказывается исключительно важным, поскольку с его помощью можно установить характер контактирования деталей при сборке, условия смазывания, прогнозировать изнашивание и пр. Однако более важно для решения проблемы повышения качества машин установить причины возникновения погрешностей, указать соответствующую операцию технологического процесса, при выполнении которой возникла данная погрешность, и принять меры к ее ликвидации.

Так, например, с помощью гармонического анализа обнаружено, что на овальный профиль поперечного сечения детали налагается трехгранный профиль. Поскольку указанные отклонения формы ухудшают качество детали, рассматривают результаты предшествующих операций и устанавливают, что, например, овальность детали вызвана овальной формой заготовки. В результате принимают меры к ликвидации или уменьшению отклонений формы еще на предшествующих технологических операциях.

Для установления указанных зависимостей применяют учение о технологической наследственности. *Технологической наследственностью* можно назвать явление переноса свойств объектов от предшествующих технологических операций к последующим. Сохранение этих свойств у деталей машин называют *технологическим наследованием*. Носителями наследственной информации является собственно материал детали, а также ее поверхности с различными параметрами, описывающими состояние этих поверхностей. В первую очередь это относится к размерам, форме и взаимному расположению элементов детали. Носители информации активно участвуют в технологическом процессе, проходя через различные операции, в ходе которых они могут изменяться частично или полностью. Гармонический анализ позволяет количественно описать всю картину трансформирования геометрических показателей изготовляемых деталей.

Качество деталей оценивается также отклонениями расположения поверхностей, т.е. отклонениями реального положения поверхности от ее номинального положения. При такой оценке отклонения формы поверхностей деталей из рассмотрения исключаются, а реальные профили заменяются прилегающими. Реальные оси, центры реальных поверхностей, поверхности симметрии и т.д. заменяются *прилегающими элементами*. Каждое из отклонений расположения поверхностей имеет свое

Витебский государственный технологический университет

точное определение и методику производственной оценки. Прилегающими элементами могут быть прямые, окружности, плоскости, цилиндры.

Качество деталей по отклонению от параллельности оценивают по положению двух прилегающих к реальным поверхностям плоскостей, измеряя расстояние между этими плоскостями в различных местах нормируемого участка. Отклонения расстояния поверхностей могут определяться с помощью осей. Ступени вала практически имеют криволинейные оси. Однако они условно представлены прямыми. Взаимное расположение цилиндрических ступеней определяется положением их осей. В общем случае оси могут иметь отклонения от параллельности, а также перекос или отклонение от пересечения. Типичным для деталей, имеющих отверстия (например, корпусных), является отклонение от соосности. Такое отклонение решающим образом влияет на долговечность подшипников, установленных в отверстиях корпусов.

С помощью прилегающих элементов определяют отклонение от перпендикулярности. Оно, например, оценивается углом между двумя плоскостями, прилегающими к реальным поверхностям конкретной детали. При оценке отклонения от симметричности относительно базовой плоскости определяют положение последней и от него измеряют расстояние до плоскости симметрии реального профиля.

Все отклонения формы и расположения поверхностей должны быть ранжированы применительно к конкретным деталям исходя из их служебного назначения. Так, в одном случае решающее влияние на качество детали оказывает отклонение от круглости, а в другом – перекос осей и т.д. Значения отклонений формы и расположения оговорены в ГОСТе 24643, в котором предусмотрено 16 степеней точности. Значения допусков от одной степени к другой увеличиваются в 1,6 раза. Установлены также уровни относительной точности, которая зависит от соотношения между допуском размера и допусками формы и расположения. Таких уровней три: А – нормальная относительная точность, В – повышенная относительная точность и С – высокая относительная точность. Для этих уровней допуск формы или расположения в среднем составляет соответственно 60, 40 и 25 % допуска размера. Для цилиндричности, круглости и профиля продольного сечения относительная геометрическая точность для А, В и С составляет соответственно 30, 20 и 12 % допуска размера [7, 19–28].

Указанные соотношения оказываются весьма полезными для практических целей. Допуск размера, установленный конструктором на основе расчетов, экспериментов или практических наблюдений, уже предполагает определенные допустимые отклонения формы и расположения поверхностей. В особых случаях допуски формы и расположения оговариваются дополнительно в технических условиях на изготовление детали. Изготовление деталей с допустимыми отклонениями парамет-

Витебский государственный технологический университет

ров является основной задачей в сфере производства. Она решается на основе разработки оптимальных технологических процессов. При этом каждому методу обработки соответствует определенная допустимая точность, что оговаривается в справочной литературе. Так, с одной стороны, для каждого номинального размера и квалитета его допуска (A, B, C) в таблицах оговариваются соответствующие допуски на любые геометрические параметры, с другой стороны, имеются табличные данные, указывающие, каким именно технологическим методом можно достичь заданной точности. Табличные данные постоянно обновляются, числовые значения уточняются, а также конкретизируются условия обработки (обработка заготовок из различных материалов, учет жесткости технологических систем и др.).

Вид допуска формы и расположения обозначаются в соответствии с ГОСТ 24643. Вид допуска представляется знаком, а сам допуск – числовым значением. Эти данные заносятся в рамку, имеющую, как правило, три секции. Вначале в рамке указывают знак, затем допуск, и, наконец, базу, относительно которой определяют допуск.

2.3.4 Параметры качества поверхностного слоя деталей

Наружный слой детали, имеющий макро и микроотклонения от идеальной геометрической формы и измененные физико-химические свойства по сравнению со свойствами основного материала, называют поверхностным слоем [7, 19–28]. Он формируется при изготовлении и эксплуатации и по глубине может составлять от десятых долей микрометра до нескольких миллиметров. Поверхностный слой определяется геометрическими характеристиками и физико-химическими свойствами (рис. 2.9).

Под геометрическими характеристиками понимают макроотклонение, волнистость, шероховатость и субшероховатость.

Макроотклонение *1* поверхности – это неровность высотой 10^{-2}–10^{3} мкм на всей ее длине или ширине.

Волнистость *2* поверхности – совокупность неровностей высотой примерно 10^{-2}–10^{3} мкм с шагом, большим, чем базовая длина *l*, используемая для измерения параметров шероховатости.

Под шероховатостью *3* поверхности понимают совокупность неровностей высотой около 10^{-2}–10^{3} мкм с шагом, меньшим, чем базовая длина, используемая для ее измерения.

Субшероховатость *4* – это субмикронеровности высотой примерно 10^{-3}–10^{-2} мкм, накладываемые на шероховатость поверхности.

Витебский государственный технологический университет

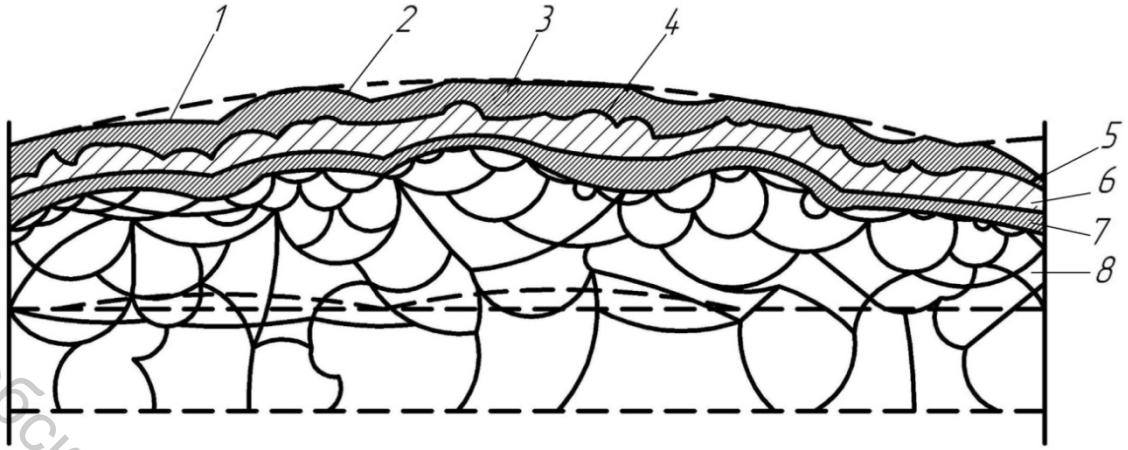


Рисунок 2.9 – Схема поверхностного слоя детали:
1 – макроотклонение; 2 – волнистость; 3 – шероховатость; 4 – субшероховатость; 5 – адсорбированная зона; 6 – зона оксидов; 7 – граничная зона материала; 8 – зона материала с измененными физико-химическими свойствами

Верхняя зона *5* толщиной около 10–100 мкм – это адсорбированный из окружающей среды слой молекул и атомов органических и неорганических веществ (например, воды, СОЖ, растворителей, промывочных жидкостей).

Промежуточная зона *6* толщиной примерно 10^{-3}–1 мкм представляет собой продукты химического взаимодействия металла с окружающей средой (обычно оксидов).

Граничная зона *7* имеет толщину, равную нескольким межатомным расстояниям со значительно измененными кристаллической и электронной структурой и химическим составом.

Зона 8 имеет толщину примерно 10^{-4}–10 мм с измененными физико-химическими свойствами по сравнению со свойствами основного материала. Под физико-химическими свойствами поверхностного слоя понимают остаточные напряжения, наклеп и структуру. Оценка геометрических характеристик и физико-химических свойств может быть непараметрической и параметрической.

Непараметрическая оценка заключается в графическом изображении макроотклонения, волнистости, шероховатости, субшероховатости, структуры, распределения остаточных напряжений и наклепа поверхностного слоя для визуального сравнения. В частности, для непараметрической оценки шероховатости используют профилограммы, кривые опорных длин профиля, кривые распределения ординат или вершин профиля, спектрограммы профиля, топограммы и т.п.

При *параметрической оценке* характеристик поверхностного слоя деталей машин используются приводимые ниже параметры.

Витебский государственный технологический университет

Макроотклонение (отклонение формы) характеризуется: максимальным макроотклонением и высотой сглаживания макроотклонения (расстояние от средней линии профиля до огибающей). Отклонение формы нормируется значением допуска формы поверхности, и рекомендована ее взаимосвязь с допуском на размер.

Волнистость (рис. 2.10) характеризуется:

W_a – средним арифметическим отклонением профиля волн, мкм,

$$W_a = (1/l_w)\int_0^{l_w} |y_i|\,dx \text{ или } W_a = \sum_{i=1}^{N} |y_i|/N,$$

где l_w – базовая длина; y_i – текущее значение ординаты профиля волн (расстояние от точки профиля до средней линии); dx – приращение абсциссы; N – число ординат профиля;

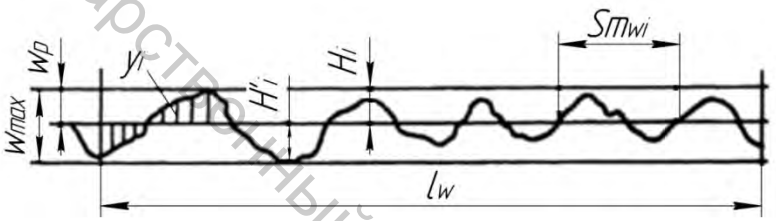


Рисунок 2.10 – Волнограмма поверхности

W_z – средней высотой волн, мкм,

$$W_z = \left(\sum_{i=1}^{5} H_i + \sum_{i=1}^{5} H_i'\right)\Big/5,$$

где H_i – текущее расстояние от средней линии до вершины волны; H_i' – текущее расстояние от средней линии до впадины волны; W_{max} – наибольшая высота профиля волн, мкм; W_p – высота сглаживания волнистости; t_{pw} – относительная опорная длина профиля волн, %;

$$t_{p_w} = \sum_{i=1}^{n} \eta_{p_w}/l_w = \eta_{p_w}/l_w,$$

где μ_{pw} – опорная длина профиля волн на уровне сечения профиля p; Sm_w – средний шаг волн, мм,

Витебский государственный технологический университет

$$Sm_w = \sum_{i=1}^{n} Sm_{wi}/n,$$

где Sm_{wi} – текущее значение шага волн; n – число шагов; R_{wcp} – средний радиус выступов волн, мм,

$$R_{wcp} = \sum_{i=1}^{n} R_{wi}/n,$$

где R_{wi} – текущее значение радиуса выступа; n – число выступов волн.

Волнистость поверхности до настоящего времени не стандартизована, поэтому на практике используют различные отраслевые нормали и рекомендации. Так, в подшипниковой промышленности при шлифовании колец (диаметр 18–120 мм) класса Н (класса 0) волнистость по высоте составляет 40–110 % шероховатости, а по классу С (4–5-й классы) – 15–60 %.

В соответствии с рекомендациями Института машиноведения РАН волнистость в зависимости от ее высоты подразделяют на девять классов:

Высота волны, мкм	1	2	4	8	16	32	64	125	250
Класс волнистости	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX

За рубежом стандартизованы параметры волнистости (табл. 2.2).

Таблица 2.2 – Стандартизованные параметры волнистости

Страна	Высота волнистости	Средняя высота волнистости	Максимальная высота волнистости	Средний шаг волнистости	Глубина нивелирования волнистости	Среднее арифметическое отклонение волнистости
Франция	W_t	W	W_{max}	A_w	W_p	W_0
Германия					-	-
Австрия					-	-
Япония				-	-	-
Великобритания		H_z		-	-	-

Шероховатость (рис. 2.11) характеризуют следующие параметры.

Витебский государственный технологический университет

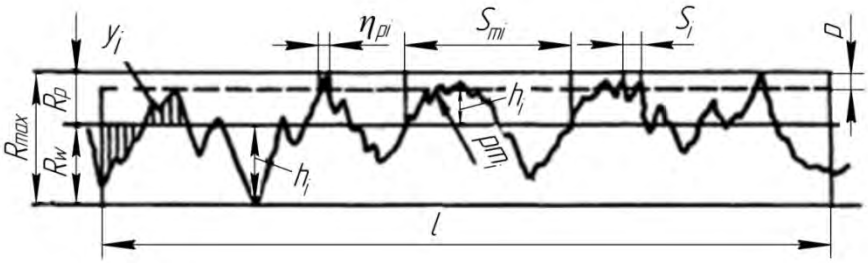


Рисунок 2.11 – Профилограмма шероховатости поверхности

Параметры по ГОСТ 2789 [19–28]:

– среднее арифметическое отклонение профиля, мкм,

$$Ra = (1/l)\int_0^l |y_i|\,dx \;\; или \;\; Ra = \sum_{i=1}^{N} |y_i|/N,$$

где l – базовая длина; y_i – текущая величина ординаты профиля шероховатости; N – число рассматриваемых ординат профиля шероховатости;

– высота неровностей профиля по десяти точкам, мкм,

$$Rz = \left(\sum_{i=1}^{5} h_i + \sum_{i=1}^{5} h_i^{'}\right)\Big/5,$$

где h_i – высота i-го наибольшего выступа профиля; $h_i^{'}$ – глубина i-й наибольшей впадины профиля.

– наибольшая высота профиля R_{max}, мкм;

– средний шаг неровностей профиля, мм,

$$Sm = \sum_{i=1}^{N} Sm_i/n,$$

где Sm_i – значение i-го шага неровностей по средней линии в пределах базовой длины;

– средний шаг местных выступов профиля, мм,

$$S = \sum_{i=1}^{N} S_i/N,$$

где S_i – значение i-го шага по вершинам местных выступов;

– относительная опорная длина профиля, %,

Витебский государственный технологический университет

$$t_p = \sum_{i=1}^{n} \eta_{pi}/l = \eta_{pi}/l,$$

где μ_{pi} – опорная длина профиля на уровне p.

Нестандартизованные параметры шероховатости:

Rq – среднее квадратичное отклонение профиля,

$$Rq = \sqrt{(1/l)\int_0^l y_i^2\,dx} \quad или \quad Rq = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} y_i^2/n},$$

Rp – высота сглаживания профиля шероховатости, мкм;

Rw – глубина сглаживания профиля шероховатости, мкм;

Kp – коэффициент заполнения профиля;

v и b – параметры начального участка кривой относительных опорных длин профиля;

$$tp = b(p/100)^v,$$

ρ_{mi} – радиус i-го выступов профиля шероховатости (рис. 2.12),

ρ – средний радиус выступов профиля шероховатости, мкм (см. рис. 2.12);

$$p_m = \sum_{i=1}^{n} p_{m_i}/n$$

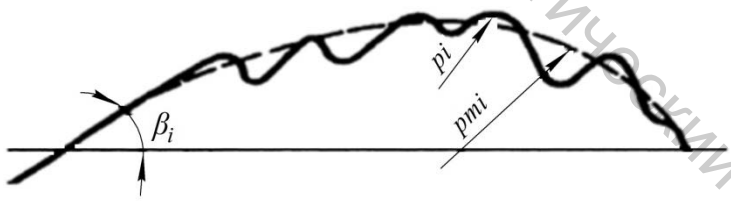


Рисунок 2.12 – Выступ профиля шероховатости

$$p = \sum_{i=1}^{n} p_i/n,$$

где ρ_i – радиус i-го местного выступа профиля; β – средний угол профиля шероховатости (см. рис. 2.12), β_i – угол наклона i-го выступа профиля.

Витебский государственный технологический университет

$$\beta = \sum_{i=1}^{n} \beta_i / n,$$

Δ-- безразмерный комплекс Крагельского – Комбалова:

$$\Delta = \frac{Rmax}{p_m b^{1/v}} \text{ или } \Delta = (100/tp)^{1/v}(Rp/p_m).$$

В таблице 2.3 приведены шероховатости, стандартизованные в различных странах [7].

Таблица 2.3 – Стандартизованные параметры шероховатости в различных странах

Страна	Параметры шероховатости														Число пара-метров
	Ra	Rp	Rm	RMS	Rz	R_{max}	R	I_t	t_p	A_r	Sm	S	Kp	K	
Россия	+				+	+									6
Австрия	+		+	Rs		Rt		Lt						+	7
Болгария	+				+	+									3
Великобрита-ния	CLA						H_1								2
Венгрия	+	Rt	Rf	hq	+	+			+				kp	kh	9
Дания	+	Ru	+	+	+	+	+	Bb	Kb					+	10
Испания	hm			h_{rms}			H						kv		4
Италия	+	Rc	Ri	Raq			+							kp	6
Нидерланды	+														1
Польша	+														3
Румыния	+						+								3
Сербия	+				+	+	+	In	Pn	k					6
США	AA			+											2
Финляндия	+														3
Франция	+	+		Rq			Rv	Lc	Tc	Av			+	kv	10
ФРГ	+	+			+	Rt		+	+						6
Чехия	+				+	+									3
Швеция	+	G		Rq			H								3
Швейцария	+	+				+	Rv,Rs	t	tc				+	kv	9
Япония															0
ISO	+				+	+									3
*Знак «+» означает стандартизованные, пустые графы – нестандартизованные параметры															

Для оценки *шероховатости поверхности с регулярным микрорефлением* с успехом могут быть использованы приведеные выше параметры или по ГОСТ 24773. Наряду с профильной оценкой шероховатости в научных исследованиях применяется топографическая

Витебский государственный технологический университет

оценка. В настоящее время предложены следующие микротопографические параметры: Ra – среднее арифметическое отклонение микроповерхности от средней плоскости; N_γ – число выступов на уровне γ; $M_в$ – число вершин выступов; $h_в$ – высота вершин выступов; H_{max} – высота наибольшего выступа; h_t – относительная опорная площадь; Δh – градиент поверхности; $K_{ср}(\gamma)$ – средняя кривизна выступов на уровне γ.

Для субшероховатости: $R_{\max c}$ – максимальная высота неровностей субшероховатости, мкм; S_{mi} – средний шаг неровностей субшероховатости.

Для оценки наклепа используются:

$H_{\mu 0}$ – поверхностная микротвердость;

ε – степень деформирования, %;

$h_н$ – глубина наклепа, мкм;

U_u – степень наклепа, %,

$$U_H = \left[\left(H_{\mu_0} - H_{\mu_{исх}}\right)/H_{\mu_{исх}}\right]100,$$

где $H_{\mu\ исх}$ – исходная микротвердость материала.

Для оценки *поверхностных остаточных напряжений* рекомендуются следующие параметры:

$\sigma'_{ост}$ – макронапряжения (напряжения 1-го рода), МПа; $\sigma''_{ост}$ – макронапряжения (напряжения 2-го рода), МПа; σ'"ост – статические искажения решетки (напряжения 3-го рода), МПа.

Для оценки *структуры* применяют:

$l_з$ – размер зерен, мм;

ρD – плотность дислокаций, см$^{-2}$;

$\boldsymbol{c_v}$ – концентрацию вакансий;

$l_б$ – размер блоков, нм;

$\alpha_б$ – угол разориентации блоков;

$<D>$ – размер областей когерентного рассеяния, нм;

$<u^2>$ – среднеквадратичное смещение атомов, вызванное статическими искажениями решетки, нм^2;

$<u_\tau^2>$ – среднеквадратичное смещение атомов, вызванное их тепловыми колебаниями, нм^2.

Для оценки *фазового состава* используются:

M_s – тип кристаллической структуры;

a, b, c (мм) и α, β, γ (°) – параметры решетки фаз.

Для оценки *химического состава* применяются:

$c(x)$ – профиль концентрации элементов в поверхностном слое, %;

$c_ф$ – концентрация элементов в фазах, %.

Витебский государственный технологический университет

Для оценки *экзоэлектронной эмиссии* поверхности используют:

I – интенсивность эмиссии, импульс;

φ – работу выхода электронов, ЭВ;

λ – глубину выхода электронов, нм.

В научных исследованиях для оценки состояния поверхностного слоя деталей все шире применяются комплексные параметры.

Комплексная оценка качества поверхностного слоя. Для комплексной оценки качества поверхностного слоя могут быть использованы сразу несколько параметров.

Так, для оценки несущей способности контактирующей поверхности могут быть использованы параметры: шероховатости – Ra и t_p или R_p; волнистости – W_p, макроотклонения – H_p. Непараметрический подход также позволяет комплексно оценить несущую способность шероховатости или волнистости поверхности.

В последние годы все активнее начинают применяться так называемые комплексные параметры, математически или физически объединяющие сразу несколько отдельных параметров.

2.4 Вопросы для самоконтроля

1. Охарактеризуйте понятие «качество».
2. Что в соответствии с международными стандартами ИСО понимается под петлёй качества?
3. Перечислите последовательность этапов цикла Деменга.
4. В чем заключается отличие понятий «управление качеством» и «контроль качества»?
5. Дайте определение понятию «система качества».
6. Какие принципы лежат в основе организации систем качества?
7. Назовите уровни качества.
8. Определите понятие «устойчивость технической системы».
9. Определите понятие «помехоустойчивость».
10. Определите понятие «управляемость технической системы».
11. Какие свойства системы объединяет ее управляемость?
12. Что характеризует критерий «способность системы»?
13. Какими свойствами обладает самоорганизующаяся система?
14. Охарактеризуйте понятие «критерий качества».
15. Перечислите группы критериев качества.
16. Что характеризуют функциональные критерии качества?
17. Что характеризует критерий технологичности?
18. Что характеризуют экономические, экологические и эргономические критерии качества?
19. Какие критерии характеризуют конкурентоспособность?

Витебский государственный технологический университет

20. По каким признакам классифицируют показатели качества?

21. На каких этапах жизненного цикла применяют расчетные и проектные показатели качества?

22. На каких этапах жизненного цикла применяют производственные и эксплуатационные показатели качества?

23. Как определить технологическую, цикловую и фактическую производительности?

24. Для чего используется понятие удельной технологической производительности?

25. Что характеризует критерий точности?

26. Запишите формулу определения критерия универсальности.

27. Приведите примеры определения критерия универсальности.

28. Сформулируйте понятие «гибкость технической системы».

29. Запишите формулу для определения критерия гибкости.

30. Чем характеризуется надежность технической системы?

31. Назовите характеристики долговечности системы.

32. Как определить коэффициент готовности при параллельном соединении элементов?

33. Как определить коэффициент готовности при последовательном соединении элементов?

34. Как определить коэффициент готовности при последовательно-параллельном соединении элементов?

35. Как определить критерий сложности детали?

36. Как определить критерий сложности сборочной единицы?

37. Как определить коэффициент готовности при параллельном соединении элементов?

38. Запишите модель для определения индекса эффективности затрат.

39. Как определить срок окупаемости?

40. Запишите модель для определения приведенных затрат.

41. Как определить годовой экономический эффект?

42. Запишите модель для определения производительности общественного труда.

43. Запишите модель для определения критерия безопасности.

44. Назовите известные вам опасные и вредные факторы при работе в механическом цехе.

45. Перечислите методы определения показателей качества.

46. В чем суть измерительного и эксперного методов определения показателей качества?

47. В чем суть оценки показателей качества по балльной системе?

48. В чем заключается комплексный метод оценки качества?

49. Как рассчитать комплексный показатель качества?

50. Как рассчитать интегральный показатель качества?

Витебский государственный технологический университет

51. Перечислите известные Вам эксплуатационные свойства деталей и их соединений.

52. Как определяется коэффициент концентрации напряжений?

53. Как определяется поверхностная контактная статическая и динамическая прочность?

54. Как определяется контактная жесткость?

55. Как определяется размерное изнашивание поверхностей?

56. Как определяется прочность посадок с натягом?

57. Перечислите свойства материалов.

58. Какие испытания проводят при определении механических свойств материалов?

59. Перечислите механические свойства материалов.

60. Перечислите эксплуатационные свойства материалов.

61. Приведите примеры эксплуатационных свойств материалов.

62. Перечислите технологические свойства материалов.

63. На какие группы подразделяются размеры деталей?

64. Дайте определение понятию «допуск размера».

65. Перечислите методы назначения допусков размеров.

66. Как на качество деталей влияют допуски формы и взаимного расположения поверхностей?

67. Назовите геометрические характеристики параметров качества поверхностного слоя деталей.

68. Из каких зон состоит поверхностный слой детали?

69. Что характеризует физико-механические свойства поверхностного слоя детали?

70. В чем суть непараметрической и параметрической оценок поверхностного слоя детали?

71. Дайте определение понятию «волнистость поверхности».

72. Перечислите параметры шероховатости поверхности?

73. Назовите известные Вам стандартизованные параметры шероховатости в различных странах.

74. Перечислите параметры оценки наклепа поверхностного слоя.

75. Какие параметры используются для оценки поверхностных остаточных напряжений поверхностного слоя?

76. Какие параметры используются для оценки структуры?

77. Какие параметры используются для оценки фазового состава поверхностного слоя?

78. Какие параметры используются для оценки химического состава поверхностного слоя?

79. Какие параметры используются для оценки экзоэлектронной эмиссии поверхностного слоя?

80. Как осуществляется комплексная оценка качества поверхностного слоя?

Витебский государственный технологический университет

3 ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТОЧНОСТИ ИЗДЕЛИЙ МАШИНОСТРОЕНИЯ

3.1 Современное понятие о точности в машиностроении

Под точностью в машиностроении понимают степень соответствия изготовляемых изделий (деталей, узлов, машин, приборов) заранее установленным параметрам, задаваемым чертежом, техническими условиями, стандартами.

Поскольку характеристик каждого изготовленного изделия, как правило, много, то из большого их количества отбирают те показатели точности, которые играют решающую роль в оценке качества изделия. Так, точностные показатели изделий могут относиться к массе изделия, напряжениям, шероховатости поверхности, отражательной способности поверхности и др. Однако в технологии машиностроения наибольшее распространение имеют геометрические показатели точности (точность линейных размеров, взаимного расположения поверхностей (параллельность, симметричность, перпендикулярность, угол и т.д.), формы поверхности (прямолинейность, цилиндричность и т.д.), шероховатость, волнистость и др.), так как именно они играют главную роль в выполнении служебного назначения машины или узла (см. главу 2).

При проектировании конструкции изделия и технологического процесса его изготовления устанавливают допустимые отклонения значений характеристик. Эти отклонения формируют допуск. Допуск представляет собой разность между двумя предельными допустимыми значениями характеристик.

Различают функциональные и технологические допуски. В функциональный допуск входят эксплуатационный и конструкторский допуски. Эксплуатационный допуск связан с возможными изменениями, происходящими в машине за период длительной эксплуатации. Конструкторский допуск регламентирует изменение различных параметров изделия, в том числе технических.

Назначение технологических допусков в технологии машиностроения находится на стадии формирования. Если функциональный или конструкторский допуск имеют вполне определенное единственное значение, устанавливаемое на рабочих чертежах в виде чисел (количественное представление), то технологические допуски формируются исходя из точности выполнения операции и зависят от множества факторов (точность металлорежущего станка, вспомогательного инструмента, станочного приспособления и режущего инструмента, внешних воздействий и др.). Поскольку после каждого технологического перехода или операции возникают свои геометрические (и иные) параметры, то они должны иметь свои технологические размеры и допуски. Про-

Витебский государственный технологический университет

межуточные размеры необходимы для конструирования технологической оснастки, применяемой в ходе изготовления детали. В машиностроении находит практика назначения допусков на технологические размеры исходя из экономической точности переходов, которые можно найти в ряде технологических справочников [19–27].

Важнейшее значение в обеспечении допусков линейных размеров и допусков взаимного расположения играет базирование. Базирование – это такой инструмент, который позволяет уже на стадии проектирования технологии обеспечить взаимное расположение комплекса обрабатываемых и необрабатываемых поверхностей, равномерность снятия припуска с поверхностей, требуемые показатели точности чертёжных размеров, а также требуемые допуски взаимного расположения поверхностей. Однако в настоящее время у исследователей имеются разногласия в вопросах терминологии базирования, методик разработки схем базирования и др. [29–73].

На всех этапах технологического процесса изготовления деталей и сборки узлов и машин неизбежны погрешности, поэтому достижение абсолютной точности невозможно [74–83 и др.]. Оценка точности достижения чертёжных размеров при изготовлении деталей может проводиться с помощью размерного анализа технологического процесса. Размерный анализ технологического процесса – это такой инструмент в проектировании технологического процесса, который позволяет до реализации технологического процесса аналитическим путём проверить возможность достижения точности чертёжных размеров и рассчитать технологические размеры и размеры заготовки [2–5, 84–91]. Важное значение имеет анализ точности и стабильности процессов и их статистический учет [2–5, 92–94].

Ещё одна особенность технологических допусков относится к сборке. На этапе конструирования изделия и проектирования технологии необходимо определить метод достижения точности замыкающего звена сборочной размерной цепи (полная, неполная или групповая взаимозаменяемость, регулировка пригонка). Далее в зависимости от метода определяеются допуски на составляющие звенья размерной цепи. Сборку нельзя себе представить без силового взаимодействия сопрягаемых деталей. Силы и моменты сил, возникающие на операциях сборки, непременно деформируют детали. Эти деформации могут быть как малыми, так и такими, которые выводят деталь за пределы допусков. Необходима оценка возникающих деформаций, т.е. погрешностей. Деформированная деталь предстаёт в совершенно новом свете, поскольку нарушаются поверхности контактов, возникают кромочные явления и целая серия отклонений от геометрических образцов, представленных на рабочих чертежах деталей. Так возникает ещё одна серия технологических допусков. Методика оценки таких допусков, их зависимость от технологических факторов и регламентирование значений факторов на

Витебский государственный технологический университет

многих машиностроительных фирмах содержатся в секрете. Решение же рассмотренной проблемы в последнее время связано с компьютерной поддержкой принимаемых технологических решений. Собственно технологические решения позволяют при правильном осмыслении физической картины явлений повысить точность по многим параметрам, не прибегая к дополнительным материальным затратам. Важное значение при проектировании технологических процессов сборки играет определение условий собираемости изделий [95–97].

Причины, вызывающие отклонения различного характера в ходе изготовления деталей, практически действуют одновременно. Все эти погрешности как бы аккумулируются на детали. Годность же самой детали проверяют соответствием параметров реальных поверхностей и параметров материала, которые к моменту контроля сформировались в результате технологических взаимодействий.

Особого внимания требует метрологический аспект проблемы точности. При выборе средств измерения следует учитывать то, что измерительные приборы и устройства характеризуются ценой деления и точностью измерения, что не всегда одно и то же. Точность средства измерения должна выбираться соответсвенно точности измеряемого параметра. Необоснованное повышение точности средства измерения приводит к повышению себестоимости изготовления изделия [22–27].

3.2 Базирование

3.2.1 Подходы к теории базирования

Несмотря на многочисленные работы отечественных и зарубежных ученых, посвященные теории базирования в машиностроении, и введение ГОСТа 21495-77 «Базирование и базы в машиностроении. Термины и определения» (далее ГОСТ), до сих пор по этому вопросу ведутся дискуссии.

Теорией базирования в машиностроении занималось много крупных исследователей. В работах исследователей К.М. Гладкова, Д.П. Маслова, Е.И. Глущенко, А.М. Каратыгина, Е.Г. Анненкова и др. не наблюдался единый подход к классификации баз и формированию основных понятий и определений теории. 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.) [29–39].

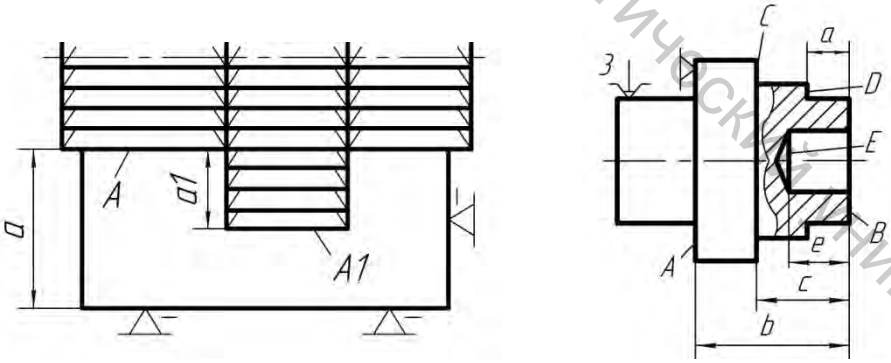
К 1976 году под руководством Б.С. Балакшина была разработана иерархическая классификация основных понятий и определений теории базирования, отраженная в ГОСТе. Последователи и ученики Б.С. Балакшина (Л.Н. Воробьев, А.А. Гусев, Ю.М. Соломенцев, И.М. Колесов

Витебский государственный технологический университет

и др.) в своих исследованиях часто использовали основные положения ГОСТа [40–49].

Но после издания ГОСТа появились работы, авторы которых не согласны с некоторыми его положениями. В работе [50, 51] говорится о том, что в зависимости от технологической задачи, решаемой при обработке заготовки, при ее базировании в приспособлении или на станке может быть использована 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 [52]. 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 3.1 а это поверхность А для поверхности А1, на рисунке 3.1 б – поверхность В для поверхностей С, Д, Е).

В работах [53, 54] 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.



а б

Рисунок 3.1 – 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 поверхно-

Витебский государственный технологический университет

стей: 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.

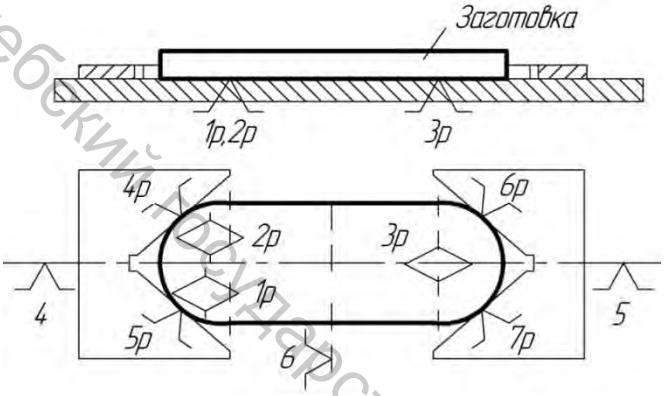


Рисунок 3.2 – Схема базирования по Б.Н. Байору

В работе [55] отмечается то, что количество опорных точек (точек соприкосновения с установочными компонентами) на схеме базирования может быть и больше, и меньше шести. Приводятся примеры «схем базирования» с тремя, семью и даже девятью опорными точками (рис. 3.2). 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).

В работе [56] 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. 3.3).

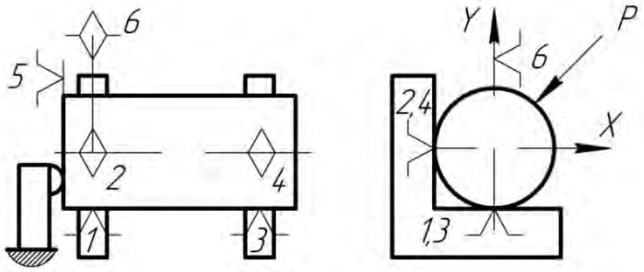


Рисунок 3.3 – Схема базирования по В.Н. Емельянову

В работах [57–59] вообще отсутствуют значки баз, а приводятся либо схемы установки некоторых классов деталей, либо конструктивное оформление приспособления, называемое «схемой базирования» [59].

В работе [60] приводятся классификация схем базирования «с замыканием по силе и по моменту». Осеопорная база с замыканием по моменту имеет вид, приведенный на рисунке 3.4, однако

Витебский государственный технологический университет

какого-либо обоснования такой классификации с точки зрения реального использования не приводится.

Особенно жесткой критике подвергся ГОСТ в работах [61, 62] Ф.Н. Абрамова. Но и в предлагаемых им новых терминах не учитывается, что понятие «базирование» используется 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*.

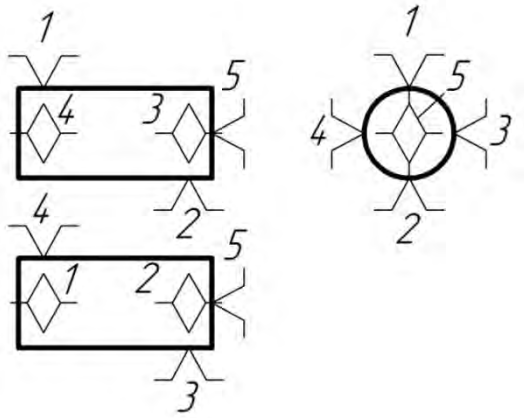


Рисунок 3.4 – Осеопорная база

Кроме того, особо следует отметить, что если на схеме базирования не указываются выдерживаемые размеры [55–62], то процесс ее разработки вовсе теряет всякий смысл.

В работе [63] 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 сложней [63].

В работе [64] теория базирования рассматривается с системных позиций. В виде тезисов утверждается то, что использование теории базирования затруднено из-за отсутствия разграничения реального процесса установки и его проектной модели. В работе [64] 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

Витебский государственный технологический университет

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.

В работах [65 и 66] под схемой базирования понимается распределение координат трёх точек по координатным плоскостям по схеме 3-2-1. Двойная опорная база может лишать заготовку двух поворотов или одного перемещения и одногго 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 – неясно. В работах также не предложено каких-либо правил, алгоритмов проектирования схем базирования, установки, порядка смены баз, заданий на проектирование приспособлений.

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 [67 и 68] под погрешностью установки понимается неточность положения заготовки, режущего инструмента, приспособления и др. 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 [69 и 70]. Здесь же приводится методика расчета погрешности базирования, под которой понимается несовпадение измерительных и технологических баз, с помощью матриц влияния. В работе [64] 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 базирова-

Витебский государственный технологический университет

ния и производится по известным (неясно каким) правилам. Дополнительно введено понятие «погрешность установки».

Появление такого множества трактовок, концепций и подходов к проблеме базирования, очевидно, является следствием несовершенства положений указанного ГОСТа, а именно:

– 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;

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

– 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 определении технологической базы ничего не говорится о *цели проектирования схемы базирования и комплекта баз* при механической обработке, 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.

3.2.2 Реальное базирование

Любая техническая система, в том числе и технологическая оснастка, создается для выполнения определенного набора функций. Главной функцией технологической оснастки является *ориентирование (базирование)* [2–5, 71–73].

Для станочных приспособлений это такое ориентирование *обрабатываемых компонентов заготовки* по отношению к направлениям рабочих движений станка и формообразующего компонента инструмента, которое *обеспечит заданные допуски взаимного расположения* (перпендикулярность, параллельность, угол) и расстояний.

Витебский государственный технологический университет

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

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

По назначению базы будем делить на: *конструкторские и технологические*, которые в свою очередь подразделяются на базы механической обработки, сборочные и измерительные.

Конструкторские базы используются для задания на чертежах взаимного расположения (линейных размеров, параллельности, перпендикулярности или в общем случае угла) элементов детали.

Технологические базы механической обработки используются для ориентации заготовки или элементов заготовки в заданной зоне станка и при проектировании технологического процесса обработки детали и станочных приспособлений. В первом случае технологические базы будем называть *реальными*, а во втором – *проектными*.

По характеру проявления различают *явные* и *скрытые* базы. К первым относят поверхности, линии и точки их пересечения. Ко вторым – условные точки, линии и плоскости (например, симметрии).

Технологические сборочные базы используются для взаимной ориентации деталей, сборочных единиц или их элементов при сборке изделия (реальные базы) и при *проектировании* технологии сборки и сборочных приспособлений (проектные базы). *Основной сборочной базой* предлагается называть совокупность поверхностей детали или сборочной единицы, которая определяет ее положение в изделии. *Вспомогательная сборочная база* – совокупность поверхностей детали или сборочной единицы, которая определяет положение присоединяемой к ней детали или сборочной единицы.

Измерительные базы используются при измерении отклонений взаимного расположения (реальные базы) и при *проектировании* технологии измерения и самих средств измерений (проектные базы). Реальная измерительная база служит для ориентации средств измерения по отношению к измеряемому объекту. Она должна совпадать с конструкторской во избежание погрешности схемы измерения.

Таким образом, под реальным базированием будем понимать: процесс ориентации заготовки или элементов заготовки в заданной зоне станка при механической обработке; взаимной ориентации деталей, сборочных единиц или их элементов при сборке изделия; ориентации средств измерения по отношению к измеряемому объекту при измерении.

Синоним слова базирование – ориентация. При решении разных задач оно имеет несколько различный смысл. Так, при обработке необ-

Витебский государственный технологический университет

ходимо так расположить заготовку в рабочей зоне станка, чтобы обеспечить заданную форму и расположение обрабатываемой поверхности (которой еще нет) при минимальных затратах на управление относительными движениями инструмента и заготовки.

Например, для обработки плоскости на строгальном или вертикально-фрезерном станке заготовку следует базировать так, чтобы направляющая и образующая будущей плоскости были соответственно параллельны продольной и поперечной подаче. В принципе можно обработать плоскость на указанных станках, даже если она наклонна по отношению к одной из подач. Для этого необходимо дополнительное управление, которое бы соответственным образом связывало перемещение вдоль этой подачи с вертикальным перемещением, зависящим от заданного угла. При такой обработке «строками» снижается производительность обработки и качество (форма) плоскости.

При обработке цилиндрической поверхности на токарном, сверлильном или расточном станке ее ось обязательно должна быть параллельна продольной подаче и совпадать с осью вращения шпинделя или инструмента.

Как же расположить поверхность, которой еще нет, в рабочей зоне станка? Очевидно, *это можно сделать, только расположив в рабочей зоне станка определенным образом те компоненты заготовки, которые были получены ранее и по отношению к которым задано расположение обрабатываемой поверхности.* Эти компоненты называют *реальными технологическими базами*. А процесс расположения заготовки в рабочей зоне станка – *реальным базированием.*

Однако кроме элементов расположения (параллельность, перпендикулярность, угол) при обработке необходимо обеспечить заданные расстояния. Заданные расстояния обеспечиваются за счет использования *принципа единства конструкторских и технологических баз* при проектном базировании *и размерной настройкой* (см. далее) при реальном базировании.

В технологии машиностроения используются *три метода реального базирования:* 1) *выверкой по разметке*; 2) *выверкой по реальной технологической базе*; 3) *сопряжением*. Базирование по разметке применяется в единичном и мелкосерийном производстве, а также при обработке крупногабаритных заготовок.

Технологической базой в случае базирования заготовки в приспособлении-спутнике (рис. 3.5) являются линии разметки *2*. Контроль их положения осуществляется обычно штангенрейсмусом 4. Регулировка положения заготовки *1* осуществляется домкратами *3* и кулаками *5*. При базировании заготовки, показанной на рисунке 3.6, на столе станка контроль положения линий разметки осуществляется штангенрейсмусом, а также с помощью чертилки *1*, закрепленной в оправке *2*. К недостаткам метода выверки по разметке следует отнести: 1) низкую точность

Витебский государственный технологический университет

(0,8...1.3 мм); 2) высокие требования к квалификации рабочего; 3) низкую производительность.

А к достоинствам: 1) возможность проверки пригодности заготовки до начала её обработки; 2) возможность наиболее рационального размещения контура детали в теле заготовки.

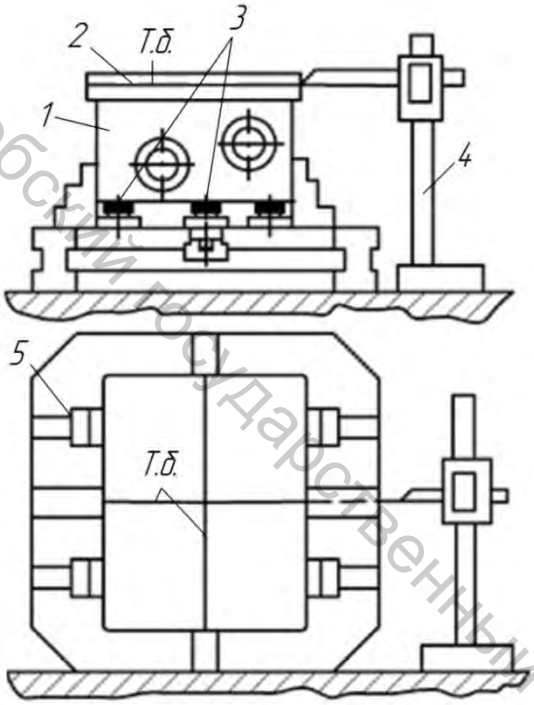


Рисунок 3.5 – Реальное базирование заготовки в приспособлении-спутнике по разметке

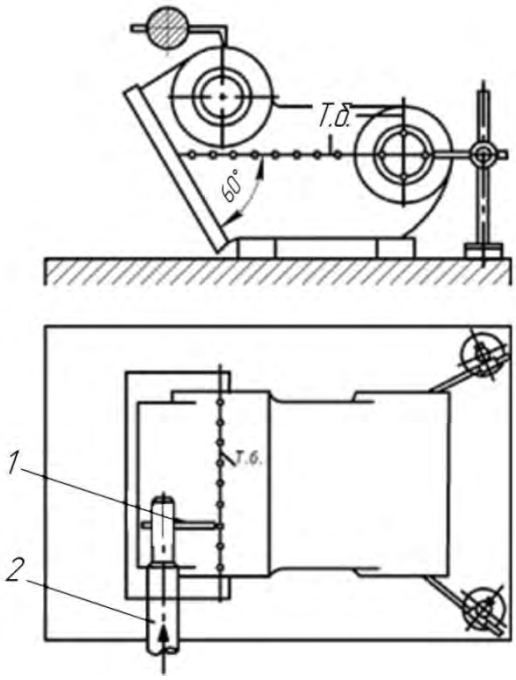


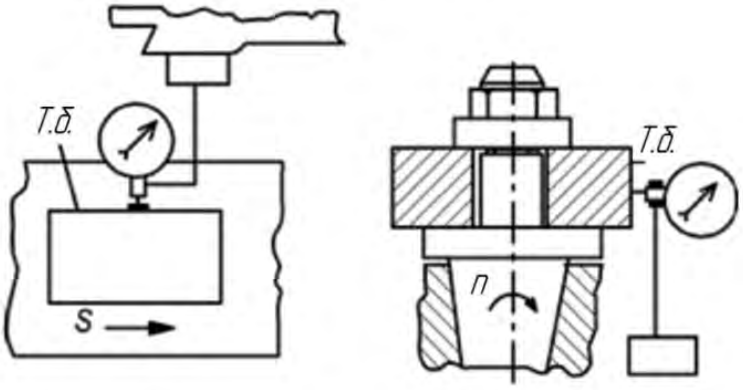
Рисунок 3.6 – Реальное базирование заготовки на столе станка

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 (рис. 3.7 а), положение оси отверстия относительно оси шпинделя станка, биение заготовки (рис. 3.7 б). К достоинству метода следует отнести высокую (0,02...0,1 мм) точность базирования, зависящую только от точности контролирующего инструмента и точности технологической базы. А к недостаткам – низкую производительность и высокие требования к квалификации рабочего.

Базирование сопряжением осуществляется при соприкосновении технологических баз заготовки с установочными элементами приспособления. Пример базирования сопряжением при механической обработке показан на рисунке 3.8. Данный метод обеспечивает как высокую производительность, так и достаточно высокую точность базирования.

Витебский государственный технологический университет

Чаще всего в качестве баз используются плоские и цилиндрические поверхности в различных сочетаниях. Реже используются конические и сферические.



а б

Рисунок 3.7 – Реальное базирование выверкой по технологической базе

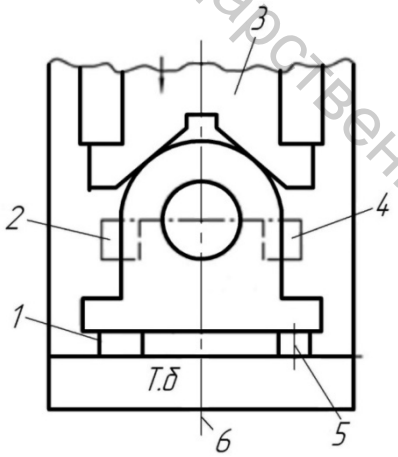


Рисунок 3.8 – Реальное базирование сопряжением: 1 и 5 – опорные планки; 2 и 4 – упоры; 3 – подвижная призма

Для сохранения полученного при базировании относительного положения заготовки под действием нагрузок, возникающих во время ее обработки, необходимо силовое замыкание. Силы (моменты сил), создающие силовое замыкание, должны быть больше сил (моментов), стремящихся нарушить относительное положение заготовки, которое было получено при базировании. Для создания силового замыкания используются: 1) упругие деформации отдельных деталей или механизмов станочного приспособления; 2) силы трения; 3) сила тяжести; 4) давление жидкости или газа; 5) магнитные и электромагнитные силы; 6) сочетание различных сил.

3.2.3 Конструкторские и технологические проектные базы. Комплект баз ориентации

Процессу реального базирования должен предшествовать процесс проектного базирования.

Прежде чем изготавливать деталь, разрабатывают ее графическую модель (чертеж), модель технологического процесса ее изготовления и лишь затем модели необходимой оснастки.

Витебский государственный технологический университет

Под *конструкторской базой* будем понимать элемент геометрической (графической) модели детали (или сочетание элементов), определяющий одну из плоскостей или осей системы координат (как правило, декартовой), по отношению к которой задается ориентация другого (*рассматриваемого*) элемента. Пример указания конструкторских баз показан на рисунке 3.9. Ориентация *рассматриваемого элемента* на чертежах указывается допусками взаимного расположения (или задается по умолчанию согласно ГОСТу 25069) и расстояниями до нескольких конструкторских баз, которые будем называть *комплектом конструкторских баз ориентации.* Так, например, ориентация оси отверстия Ø $20^{+0.1}$ задана по отношению к двум комплектам конструкторских баз ориентации:

1) с помощью допуска перпендикулярности по отношению к базе А и с помощью линейных размеров 50±0,1 по отношению к оси отверстия Ø$18^{+0.1}$ и линейного размера 30±0,2 по отношению к плоскости Е (комплект баз ориентации – две взаимно перпендикулярные плоскости (А и Е) и ось отверстия Ø$18^{+0.1}$);

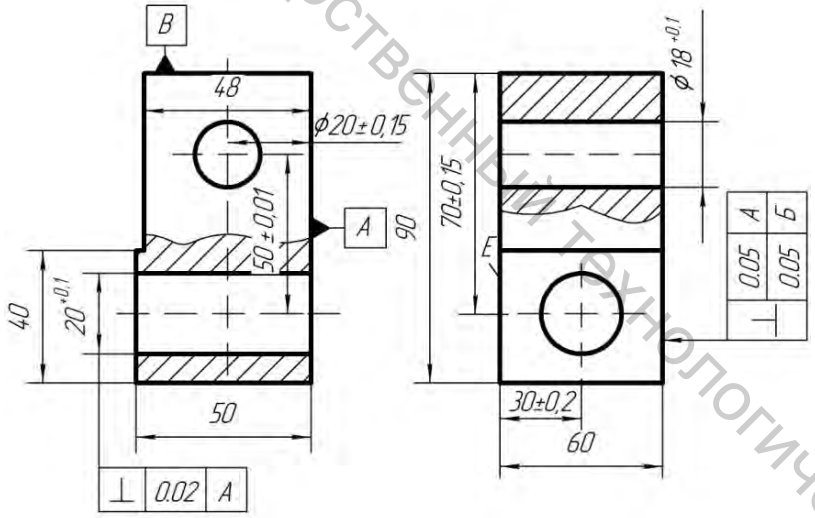


Рисунок 3.9 – Эскиз детали

2) с помощью допуска перпендикулярности по отношению к базе А и с помощью линейных размеров 70±0,15 по отношению к плоскости Б и линейного размера 30±0,2 по отношению к плоскости Е (комплект баз ориентации – три взаимно перпендикулярные плоскости (А, Б и Е)).

Основными видами расположения элементов при конструировании деталей являются: *параллельность*, *перпендикулярность*, *угол*, *соосность*, *симметрия*. Причем два последних вида являются производными от параллельности.

При проектировании технологических процессов механической обработки или станочных приспособлений с учетом порядка обработки следует указывать *проектные технологические базы механической обработки*. *Технологической проектной базой* (далее технологические базы) будем называть элемент геометрической (графической) модели заготовки, определяющий одну из плоскостей или осей системы коорди-

Витебский государственный технологический университет

нат, по отношению к которой задается ориентация (расстояние и допуск взаимного расположения) *обрабатываемого элемента конструкции*.

Под *проектным базированием* будем понимать введение системы отсчета (или собственной системы координат), сопряженной (соприкасающейся) с технологическими базами.

Указанную систему координат логично назвать *собственной*, так как она строится на элементах модели детали, или *базовой*, так как она определяет комплект баз, по отношению к которому ориентируется обрабатываемый элемент конструкции («*комплект технологических баз ориентации» или «комплект баз»*).

По виду базы будем делить на: оси и плоскости. Различные сочетания осей или плоскостей в базовой системе координат определяют комплекты баз ориентации конструктивных элементов.

В случае использования декартовой системы отсчета в подавляющем большинстве случаев используется четыре варианта *комплектов баз ориентации* конструктивных элементов деталей (см. табл. 3.1):

а) три взаимно перпендикулярные плоскости, среди которых может быть плоскость симметрии (табл. 3.1, поз. 1);

б) плоскость и две оси, перпендикулярные к ней (табл. 3.1, поз. 3);

в) две взаимно перпендикулярные плоскости и ось, которая перпендикулярна к одной из них (в частном случае ось может лежать в плоскости, которая в общем случае параллельна оси) (табл. 3.1, поз. 2);

г) плоскость и две оси, одна из которых перпендикулярна, а другая параллельна этой плоскости (в частном случае она может лежать в этой плоскости) (табл. 3.1, поз. 4);

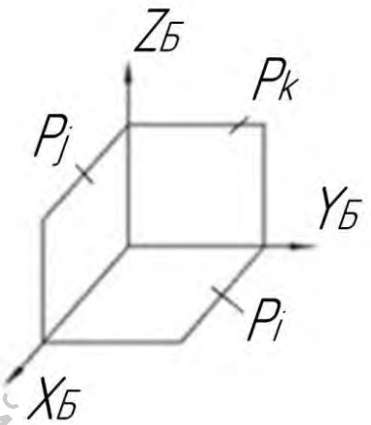
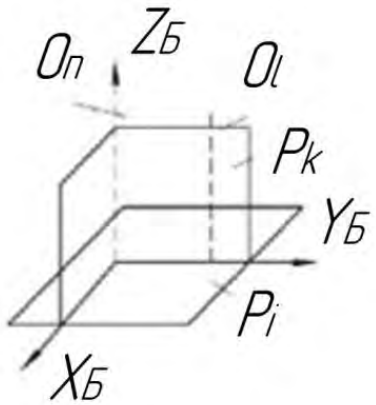
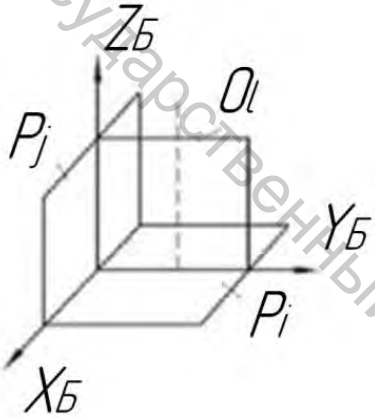
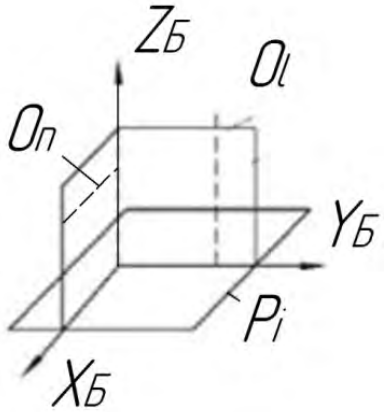
д) три взаимно перпендикулярных оси.

В частных случаях вариантов б и г оси могут лежать в плоскостях, которым они параллельны. В варианте а одна из плоскостей может быть плоскостью симметрии. Плоскость и оси симметрии согласно ГОСТ 21495-77 называются *скрытыми технологическими базами*, остальные базы комплекта – *явными технологическими базами*. Реальные базы бывают только явными.

Относительное угловое положение *оси* осесимметричного элемента конструкции (поверхности вращения) на чертеже детали или оси обрабатываемой поверхности заготовки на операционном эскизе должно быть задано необходимым и достаточным числом показателей. 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.*

Витебский государственный технологический университет

Таблица 3.1 – Варианты комплектов баз ориентации конструктивных элементов

1		3	
	$P_i \perp P_j \perp P_k$		$(O_l \perp P_i) \wedge (O_n \perp P_i)$
2		4	
	$P_i \perp P_j$ $((O_l // P_i) \wedge (O_l \perp P_j)) \vee$ $((O_l // P_j) \wedge (O_l \perp P_i))$		$((O_l \perp P_i) \wedge (O_n // P_i)) \vee$ $((O_n \perp P_i) \wedge (O_l // P_i))$

На рисунке 3.11 приведен пример некорректного задания точности расположения оси обрабатываемого отверстия. Допуск параллельности оси к базе Б, указанный на чертеже детали, избыточен, так как допуск перпендикулярности относительно базы А однозначно задает относительное положение оси. Поле допуска параллельности будет дублировать поле допуска перпендикулярности (рис. 3.10).

Относительное угловое положение плоского конструктивного элемента (*плоскости*) на чертеже детали или обрабатываемой плоскости заготовки на операционном эскизе также должно быть задано необходимым и достаточным числом показателей. 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.*

Витебский государственный технологический университет

Таким образом, можно определить варианты однозначного задания ориентации элементов конструкции относительно того или иного комплекта баз ориентации. Проведенный анализ показывает, что в большинстве случаев используется 62 варианта задания ориентации обрабатываемой оси или плоскости конструктивного элемента относительно того или иного комплекта баз ориентации:

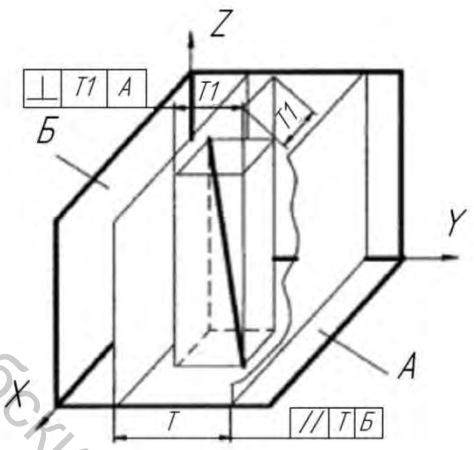


Рисунок 3.10 – Схема распределения полей допусков перпендикулярности и параллельности относительно баз А и Б

Если технологическими базами являются три плоскости (комплект баз № 1, табл. 3.1), то расположение оси осесимметричного конструктивного элемента (обрабатываемой поверхности) может задаваться допуском либо:

– перпендикулярности к одной из плоскостей комплекта баз ориентации (O_{10}) (рис. 3.12);

– параллельности относительно двух плоскостей комплекта баз (O_{11}) (рис. 3.12);

– параллельности относительно одной плоскости и углового расположения относительно другой плоскости комплекта баз (O_{12}) (рис. 3.12);

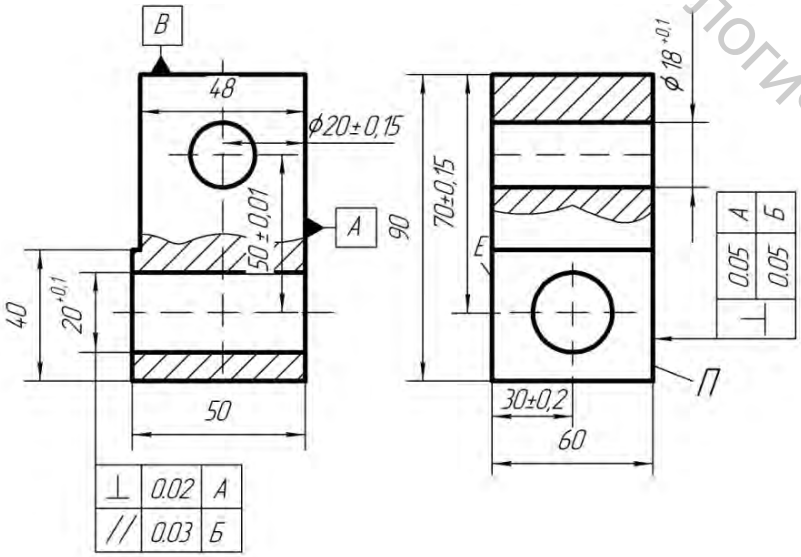


Рисунок 3.11 – Иллюстрация некорректного задания допуска взаимного расположения

– углового расположения относительно двух плоскостей комплекта баз (O_{13}) (рис. 3.12);

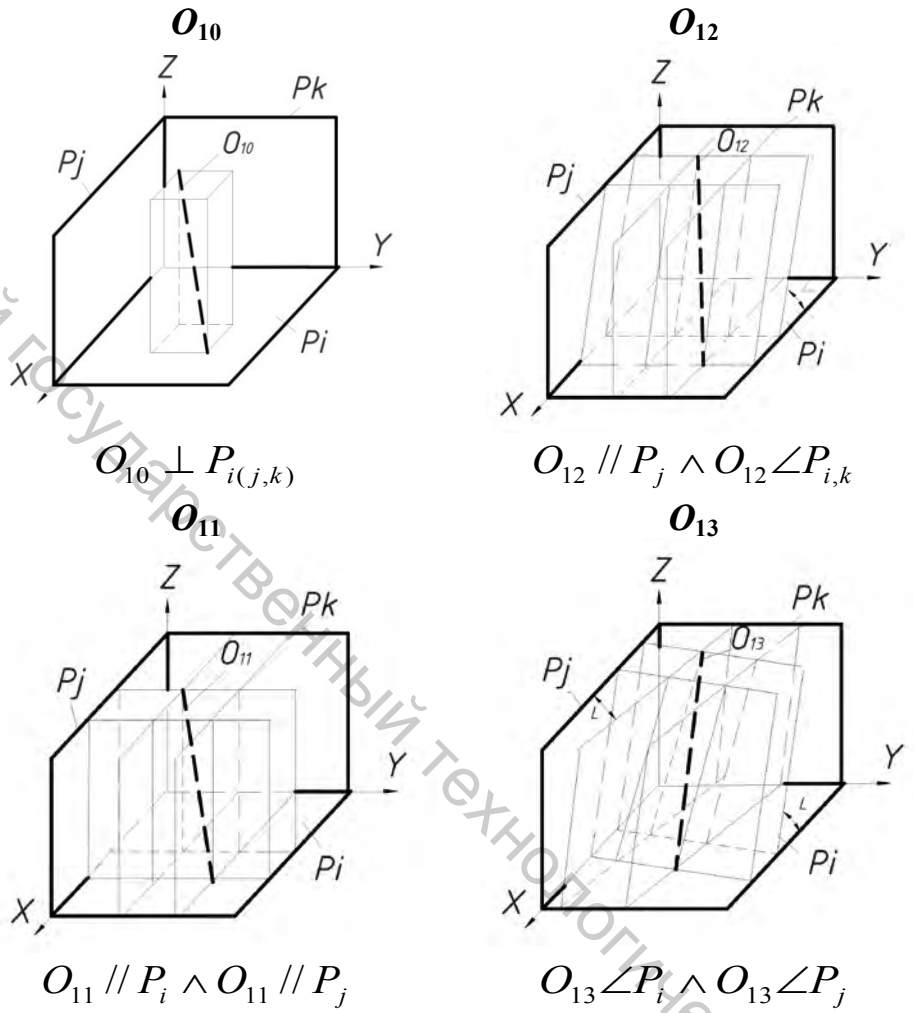
– соответствующими двумя координатами точки на оси (линейными размерами).

Если технологическими базами являются две плоскости и ось, перпендикулярная к одной из них (комплект баз № 2, табл. 3.1), то расположение оси обрабатываемой поверхности может задаваться допуском либо:

Витебский государственный технологический университет

– перпендикулярности к плоскости комплекта, перпендикулярной оси (O_{20});

– перпендикулярности к плоскости комплекта баз, параллельной оси комплекта (O_{21});



$O_{10} \perp P_{i(j,k)}$ $\quad$ $O_{12} // P_j \wedge O_{12} \angle P_{i,k}$

$O_{11} // P_i \wedge O_{11} // P_j$ $\quad$ $O_{13} \angle P_i \wedge O_{13} \angle P_j$

Рисунок 3.12 – Обозначения задания ориентации оси относительно первого комплекта баз

– параллельности относительно оси комплекта баз (O_{22});

– перпендикулярности к оси комплекта баз и параллельности к плоскости комплекта, параллельной оси (O_{23});

– параллельности относительно плоскостей комплекта (O_{24});

– параллельности относительно плоскости комплекта, параллельной оси и углового расположения относительно другой плоскости комплекта (O_{25});

– углового расположения относительно двух плоскостей комплекта (O_{26});

– параллельности относительно плоскости комплекта, параллельной оси и углового расположения относительно оси комплекта (O_{27});

Витебский государственный технологический университет

– углового расположения относительно плоскости комплекта, параллельной оси и углового расположения относительно оси (O_{28});

– параллельности относительно плоскости комплекта, перпендикулярной оси комплекта баз и углового расположения относительно другой плоскости комплекта (O_{29});

– соответствующими двумя координатами точки на оси (линейными размерами).

Если технологическими базами являются две параллельные оси и плоскость перпендикулярная к ним (комплект баз № 3, табл. 3.1), то расположение оси обрабатываемой поверхности может задаваться допуском либо:

– перпендикулярности к плоскости комплекта баз (O_{30});

– параллельности относительно оси (O_{31});

– перпендикулярности к плоскости комплекта, проходящей через оси (O_{32});

– параллельности относительно плоскости комплекта, проходящей через оси, и параллельности к плоскости комплекта (O_{33});

– параллельности относительно плоскости комплекта, проходящей через оси, и углового расположения оси к плоскости комплекта (O_{34});

– углового расположения к плоскости комплекта, проходящей через оси, и углового расположения к плоскости комплекта (O_{35});

– параллельности к плоскости комплекта, проходящей через оси, и углового расположения оси к оси комплекта баз (O_{36});

– углового расположения к плоскости комплекта, проходящей через оси, и параллельности к плоскости комплекта (O_{37});

– углового расположения к плоскости комплекта, проходящей через оси, и углового расположения к оси комплекта (O_{38}).

– соответствующими двумя координатами точки на оси (линейными размерами).

Если технологическими базами являются две пересекающиеся под прямым углом оси и плоскость перпендикулярная к одной из них (комплект баз № 4, табл. 3.1), то расположение оси обрабатываемой поверхности может задаваться допуском либо:

– перпендикулярности плоскости комплекта баз (O_{40});

– перпендикулярности к оси комплекта, параллельной плоскости, и параллельности плоскости комплекта (O_{41});

– параллельности к оси комплекта баз, параллельной плоскости (O_{42});

– параллельности к оси комплекта, перпендикулярной плоскости (O_{43});

– перпендикулярности к оси комплекта, параллельной плоскости и перпендикулярности к оси комплекта перпендикулярной плоскости (O_{44});

Витебский государственный технологический университет

– углового расположения к оси комплекта, параллельной плоскости и параллельности плоскости комплекта баз (O_{45});

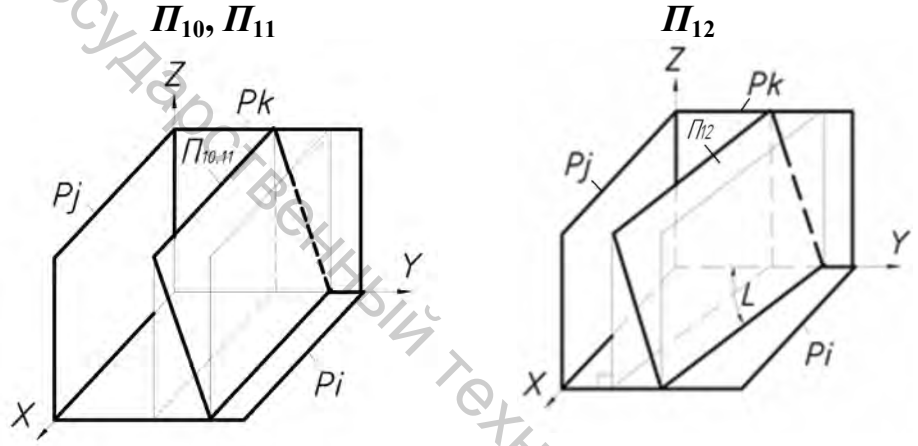
– углового расположения к оси комплекта, параллельной плоскости и углового расположения к плоскости комплекта (O_{46});

– углового расположения к оси комплекта, параллельной плоскости и углового расположения к оси комплекта перпендикулярной плоскости (O_{47});

– соответствующими двумя координатами точки на оси (линейными размерами).

Если технологическими базами являются три плоскости (комплект баз № 1, табл. 3.1), то расположение обрабатываемого плоского конструктивного элемента может задаваться допуском либо:

– перпендикулярности к двум плоскостям комплекта баз ($П_{10}$) (рис. 3.13);



$П_{10} \perp P_i \wedge P_j \quad П_{11} // P_i \qquad П_{12} \perp P_i \wedge П_{12} \angle P_{k,j}$

Рисунок 3.13 – Обозначения некоторых вариантов задания ориентации плоскости относительно первого комплекта баз

– параллельности к одной плоскости комплекта баз ($П_{11}$) (рис. 3.13);

– перпендикулярности к одной плоскости комплекта и углового расположения относительно другой ($П_{12}$) (рис. 3.13);

– углового расположения относительно двух плоскостей комплекта баз ($П_{13}$);

– соответствующей координатой точки на плоскости (линейным размером).

Если технологическими базами являются две плоскости и ось, перпендикулярная к одной из них (комплект баз № 2, табл. 3.1), то расположение обрабатываемой плоской поверхности может задаваться допуском либо:

– перпендикулярности к двум плоскостям комплекта баз ($П_{20}$);

Витебский государственный технологический университет

– параллельности к плоскости комплекта баз, параллельной оси ($П_{21}$);

– параллельности к плоскости комплекта баз, перпендикулярной оси ($П_{22}$);

– перпендикулярности рассматриваемой плоскости к оси комплекта баз ($П_{23}$);

– параллельности к оси комплекта и перпендикулярности плоскости комплекта, параллельной оси ($П_{24}$);

– углового расположения относительно плоскости комплекта, перпендикулярной оси, и перпендикулярности плоскости к плоскости комплекта параллельной оси ($П_{25}$);

– углового расположения относительно плоскости комплекта, параллельной оси и перпендикулярности плоскости к плоскости комплекта, перпендикулярной оси ($П_{26}$);

– углового расположения относительно оси комплекта и перпендикулярности плоскости к плоскости комплекта, параллельной оси ($П_{27}$);

– углового расположения относительно оси комплекта и углового расположения к плоскости комплекта, параллельной оси ($П_{28}$);

– углового расположения относительно двух плоскостей комплекта ($П_{29}$);

– соответствующей координатой точки на плоскости (линейным размером).

Если технологическими базами являются две параллельные оси и плоскость перпендикулярная к ним (комплект баз № 3, таблица 3.1), то расположение обрабатываемой плоской поверхности может задаваться допуском либо:

– перпендикулярности к двум плоскостям комплекта ($П_{30}$);

– параллельности к плоскости комплекта, проходящей через оси ($П31$);

– параллельности к плоскости комплекта ($П_{32}$);

– перпендикулярности оси комплекта ($П_{33}$);

– перпендикулярности к плоскости комплекта и углового расположения к плоскости комплекта, проходящей через оси ($П_{34}$);

– углового расположения к плоскости комплекта и перпендикулярности к плоскости комплекта, проходящей через оси ($П_{35}$);

– углового расположения к плоскости комплекта, углового расположения к плоскости комплекта, проходящей через оси ($П_{36}$);

– углового расположения к оси комплекта и углового расположения к плоскости комплекта, проходящей через оси ($П_{37}$);

– соответствующей координатой точки на плоскости (линейным размером).

Если технологическими базами являются две пересекающиеся под прямым углом оси и плоскость перпендикулярная к одной из них (ком-

Витебский государственный технологический университет

плект баз № 4, табл. 3.1), то расположение обрабатываемой плоской поверхности может задаваться допуском либо:

– перпендикулярности к оси комплекта, перпендикулярной плоскости комплекта баз ($П_{40}$);

– перпендикулярности к оси комплекта баз, параллельной плоскости комплекта ($П_{41}$);

– перпендикулярности к плоскости комплекта баз и параллельности к оси комплекта, параллельной плоскости комплекта ($П_{42}$);

– перпендикулярности к плоскости комплекта и углового расположения к оси комплекта, параллельной плоскости комплекта ($П_{43}$);

– углового расположения к оси комплекта, параллельной плоскости комплекта, и параллельности к оси комплекта, перпендикулярной плоскости комплекта ($П_{44}$);

– углового расположения к плоскости комплекта и параллельности к оси комплекта, параллельной плоскости комплекта ($П_{45}$);

– углового расположения к оси комплекта, перпендикулярной плоскости комплекта, и параллельности к оси комплекта, параллельной плоскости комплекта ($П_{46}$);

– углового расположения к плоскости комплекта и углового расположения к оси комплекта, параллельной плоскости комплекта ($П_{47}$);

– углового расположения к оси комплекта, перпендикулярной плоскости комплекта, и углового расположения к оси комплекта, параллельной плоскости комплекта ($П_{48}$);

– соответствующей координатой точки на плоскости (линейным размером).

Варианты однозначного задания оси или плоскости можно представить в виде схемы (рис. 3.14). Модель позволяет осуществлять оценку корректности задания допусков взаимного расположения и служит основой проектирования схемы базирования (см. приложение А).

На чертеже детали часто не указываются допуски перпендикулярности, параллельности, соосности, пересечения осей и симметричности. Но базовые элементы и показатели точности расположения заданы «по умолчанию». Их можно определить по таблицам ГОСТа 25069 (приложение Б) на неуказанные допуски взаимного расположения в зависимости от номинального размера (L) и размера, координирующего расположение (L_o), а также от квалитета точности размеров (рис. 3.15).

Например, необходимо определить неуказанные допуски перпендикулярности поверхностей для детали, представленной на рисунке 3.16. Неуказанные предельные отклонения размеров – по h14; $\pm t_2/2$.

За базу для определения неуказанных допусков перпендикулярности элементов А, Б, Г, Д, Ж, К в вертикальной плоскости принимают поверхность И (поверхность, имеющая больший размер в рассматриваемых перпендикулярных направлениях).

Витебский государственный технологический университет

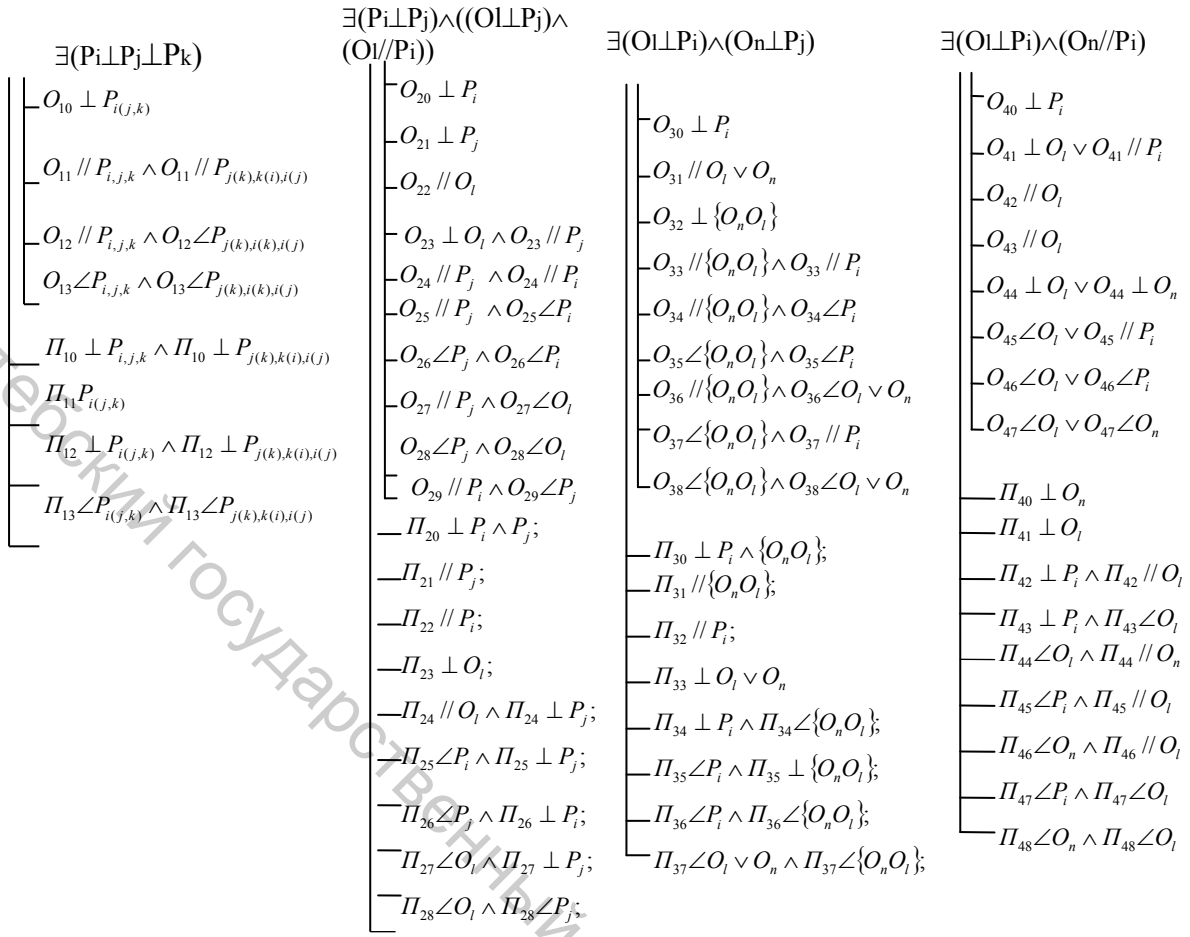


Рисунок 3.14 – Схема вариантов корректного задания допусков взаимного расположения относительно комплектов баз

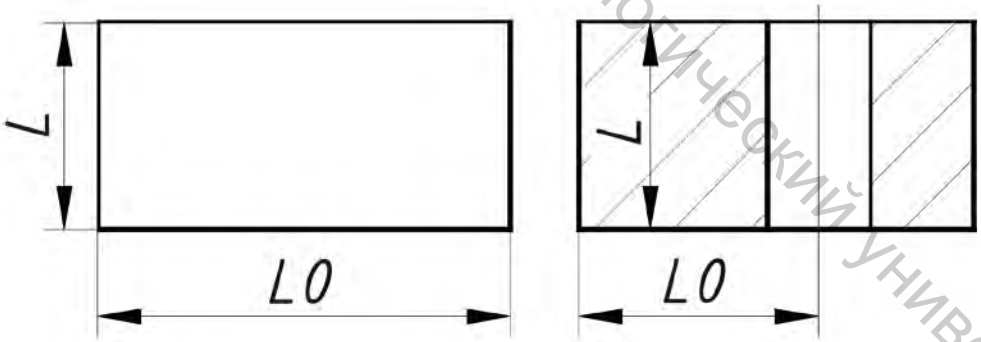


Рисунок 3.15 – Иллюстрация номинального размера (L) и размера, координирующего расположение рассматриваемого компонента (L_o)

Неуказанные допуски перпендикулярности элементов А, Б, Г, Д, Ж, К относительно поверхности И.

Для поверхностей А и Ж: номинальный размер – 30 мм; определяющий допуск размера – *IT*14; неуказанный допуск перпендикулярности – 0,2 мм.

Витебский государственный технологический университет

Для поверхности *Д*: номинальный размер – 10 мм; определяющий допуск размера – t_2 (средний класс точности); неуказанный допуск перпендикулярности – 0,1 мм.

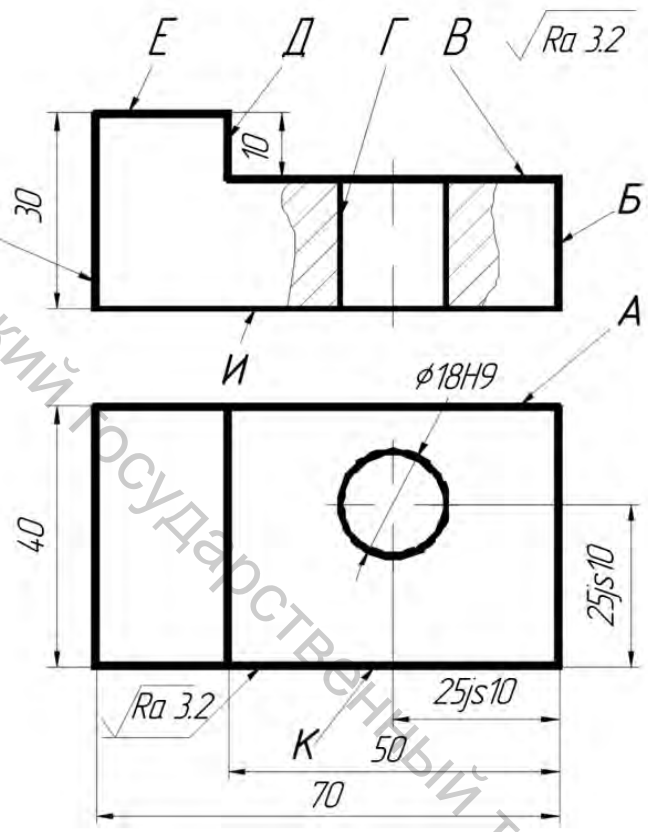


Рисунок 3.16 – Пример определения неуказанных допусков перпендикулярности

Для поверхностей *Б* и *Г*: номинальный размер – 20 мм; неуказанный допуск перпендикулярности – 0,1 мм.

Числовые значения неуказанных допусков соосности, пересечения осей и симметричности определяются из соответствующих таблиц приложения Б.

Допуск параллельности составляет в зависимости от уровня заданной геометрической точности от 0,6 до 0,25 допуска на размер. Например, допуск параллельности плоскостей *А* и *К* при повышенной геометрической точности и допуске на размер 40 по 14-му квалитету, равному 0,62 мм, составляет 0,4∗0,62 = 0,248 мм на всей длине.

3.2.4 Понятие теоретических схем базирования и установки. Настроечная база

Под *теоретической схемой базирования* при механической обработке (или просто *схемой базирования*) будем понимать графическое изображение геометрической модели заготовки (абсолютно твердого тела, поверхности которого (в том числе плоскости, оси и центры симметрии) идеальны) в состоянии после выполнения рассматриваемой операции, на которой выделены обработанные поверхности, проставлены обозначения размеров, допусков взаимного расположения и условные значки, интерпретирующие точки сопряжения и направляющие

Витебский государственный технологический университет

векторы, накладывающие определенное число *связей*, а также проведена базовая система координат.

Под *целью разработки теоретической схемы базирования* при механической обработке (т.е. проектного базирования) будем понимать *обеспечение* (еще на стадии проектирования) *требуемых показателей взаимного расположения поверхностей за счет наложения на поверхности баз ориентации определенного числа связей*.

Связь отражает отсутствие неопределенности положения обрабатываемого компонента в базовой системе координат. Связь определяет положение точки сопряжения (соприкосновения) ранее полученных элементов геометрической модели заготовки (ГМЗ) с ее плоскостями в направлении, перпендикулярном той из плоскостей базовой системы координат, в которой лежит рассматриваемая точка сопряжения. Чтобы определить направление связи и направление оси базовой (собственной) системы координат (БСК, ССК), предлагается использовать *направляющий вектор*, перпендикулярный соответствующей плоскости базовой системы координат, и определяющий направление оси базовой системы координат.

Сочетания точек сопряжения в базовой системе координат, расположенные на каждой из баз ориентации, могут накладывать на геометрическую модель заготовки разное число связей. Оно определяет *вид компонента комплекта баз*. Сочетания точек сопряжения указанный выше ГОСТ определяет как установочную, направляющую, опорную, двойную опорную, двойную направляющую базы. Приведенные названия технологических баз нельзя воспринимать буквально, ибо опорной базой заготовка ни на что не опирается, направляющей базой никуда не направляется, а на установочную – не всегда устанавливается. Поэтому предлагается вместо этих терминов использовать соответственно следующие: тройная однонаправленная, двойная однонаправленная, одиночная, двойная разнонаправленная, четверная базы. Также предлагается использовать новое понятие – тройная разнонаправленная база, отсутствующее в ГОСТе.

Эти термины легко определить с помощью понятий – точка сопряжения, направляющий вектор. Так, например, под *тройной однонаправленной (установочной)* технологической базой предлагается считать три точки сопряжения, не лежащие на одной прямой и имеющие одинаковое направление направляющих векторов, накладывающие на геометрическую модель заготовки три связи: одну линейную и две угловых (рис. 3.17).

Витебский государственный технологический университет

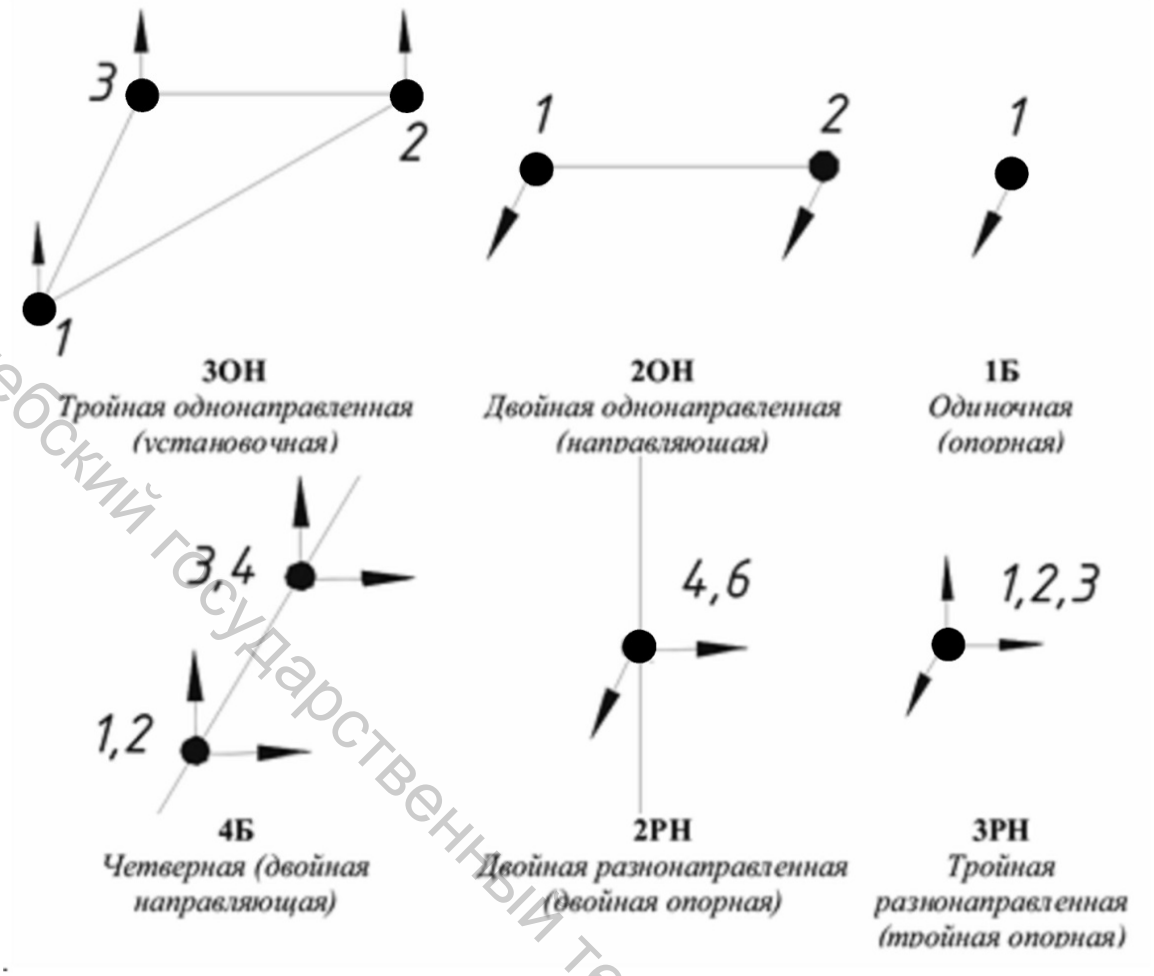


Рисунок 3.17 – Классификация и обозначение баз по числу налагаемых связей

Различные виды компонентов комплекта баз могут сочетаться между собой в комплект девятью различными способами (рис. 3.18). На рисунке 3.18 а изображены тройная однонаправленная (установочная) (*1*,*2*,*3*), двойная однонаправленная (направляющая) (*4*, *5*) и одиночная (опорная) (6) базы. На рисунке 3.18 б изображены тройная однонаправленная (установочная) (*1*, *2*, *3*), двойная разнонаправленная (двойная опорная) (*5*, *6*) и одиночная (опорная) (*4*) базы. На рисунке 3.18 в изображены четверная (двойная направляющая) (*1*, *2*, *3*, *4*) и две одиночные (опорные) ((*5*) и (*6*)) базы. На рисунке 3.18 г изображены четверная (двойная направляющая) (*1*, *2*, *3*, *4*) и двойная разнонаправленная (двойная опорная) (*5*, *6*) базы. На рисунке 3.18 д изображены тройная разнонаправленная (тройная опорная) (*1*, *2*, *3*) и три одиночных (опорные) (*4*), (*5*), *6*) базы. На рисунке 3.18 ж изображены тройная разнонаправленная (тройная опорная) (*1*, *2*, *3*), двойная разнонаправленная (двойная опорная) (*4*, *6*) и одиночная опорная (*5*) базы. На рисунке 3.18 з изображены тройная разнонаправленная (тройная опорная) (*1*, *2*, *3*), двойная однонаправленная (направляющая) (*4*, *5*) и одиночная (опорная) (*6*) базы. На рисунке 3.18 и изображены три двойных однонаправ-

Витебский государственный технологический университет

ленных (направляющих) (*1*, *2*), (*3*, *4*) и (*5*,*6*) базы. На рисунке 3.18 к изображены три двойных разнонаправленных (двойных опорных) (*1*, *2*), (*3*, *4*) и (*5*, *6*) базы.

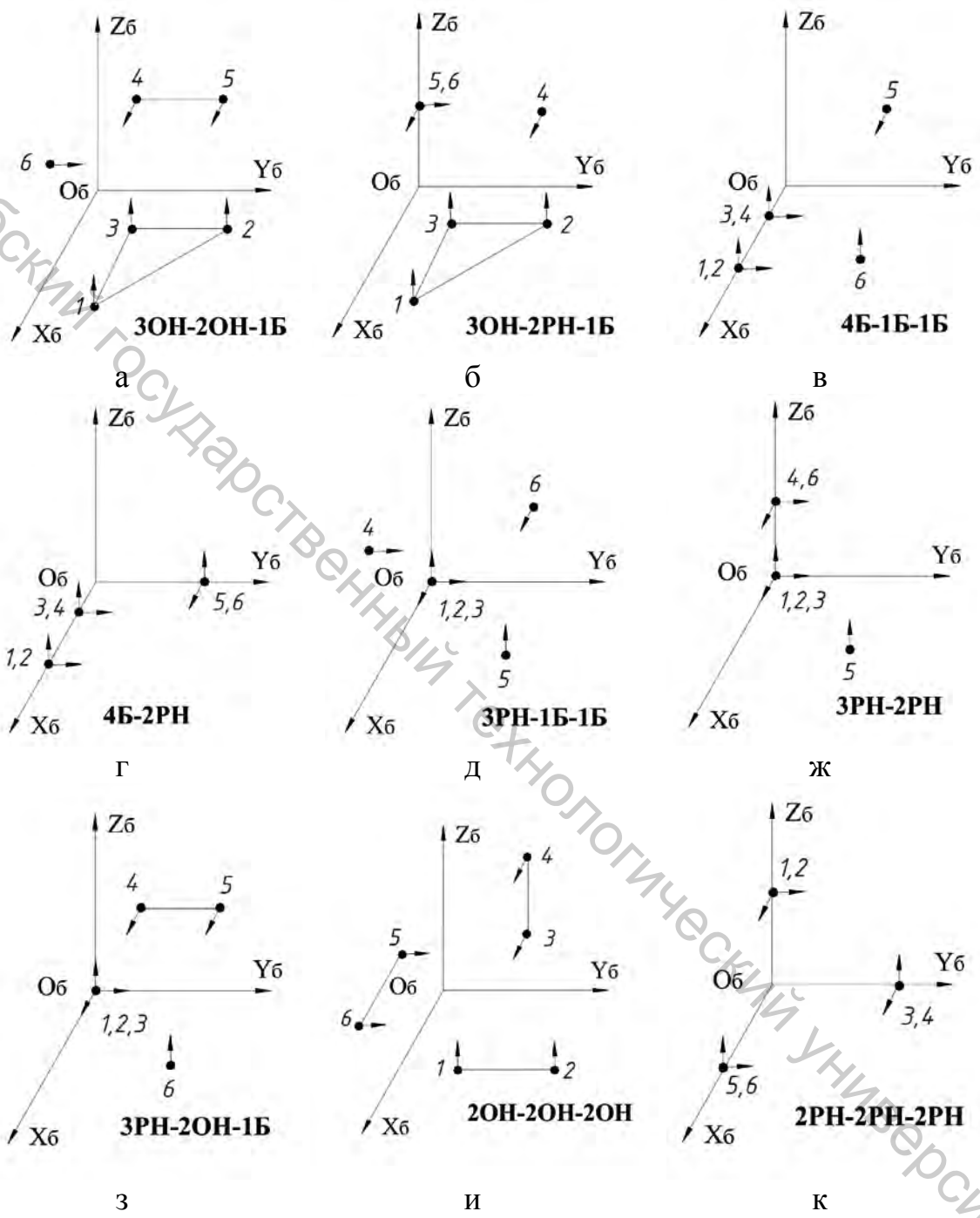


Рисунок 3.18 – Варианты расположения точек сопряжения и количества связей технологических баз:
$O_б X_б Y_б Z_б$ – базовая система координат; 1–6 – точки сопряжения; стрелками показаны направляющие векторы

Витебский государственный технологический университет

Несложно определить возможные варианты реализации технологических баз. Так, например, тройная однонаправленная (установочная) база может быть реализована:

– плоскостью модели заготовки;

– двумя образующими, которые принадлежат пересекающимся или параллельным цилиндрам и лежат в одной плоскости (рис. 3.19);

– образующими цилиндра и конуса, лежащими в одной плоскости (рис. 3.20);

– направляющей окружностью тора (рис. 3.21 а);

– наружными точками трех сфер, лежащих в одной соприкасающейся с ними плоскости (рис. 3.21 б);

– двумя пересекающимися (или параллельными) осями цилиндров.

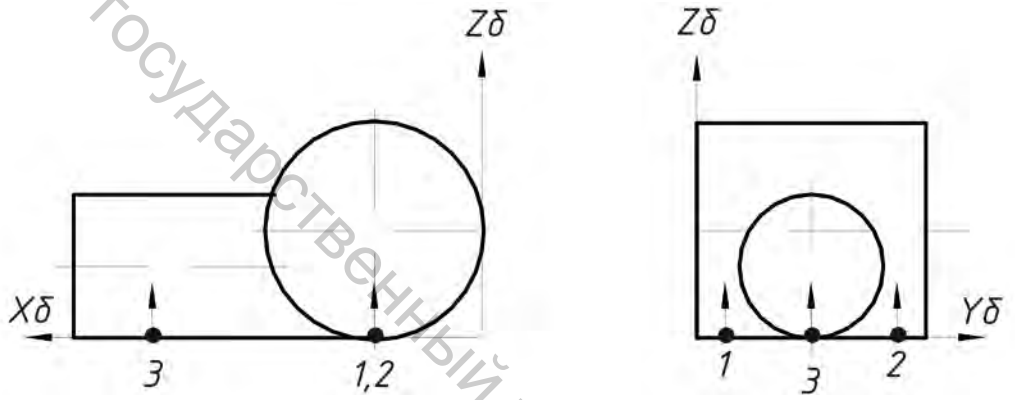


Рисунок 3.19 – Схема реализации тройной однонаправленной базы с помощью двух образующих, принадлежащих пересекающимся цилиндрам и лежащих в одной плоскости

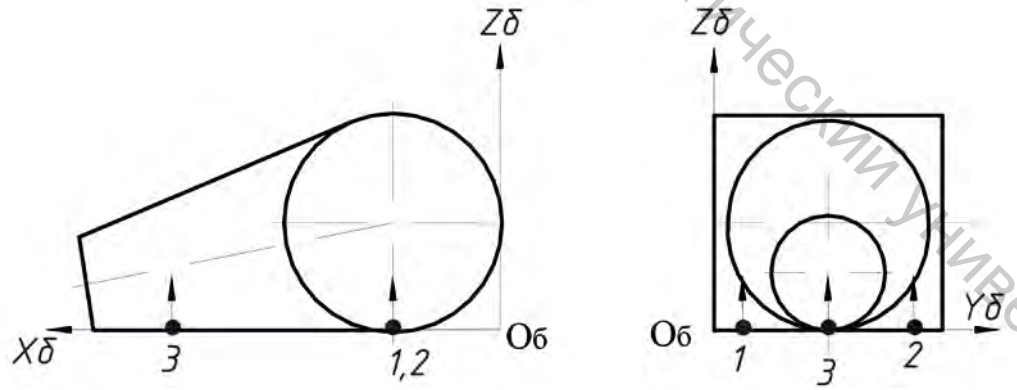


Рисунок 3.20 – Схема реализации тройной однонаправленной базы с помощью образующих цилиндра и конуса, лежащих в одной плоскости

Двойная однонаправленная (направляющая) технологическая база формируется двумя, не слившимися точками сопряжения, имеющими одинаковое направление направляющих векторов (рис. 3.17; рис. 3.18 а,

Витебский государственный технологический университет

з – точки *4*,*5*; и точки *1*,*2*; *3*,*4*; *5*,*6*). Двойная однонаправленная база накладывает на модель заготовки две связи, которые обеспечивают определенность расстояния обрабатываемого элемента ГМЗ вдоль одной из осей базовой системы координат и определенность углового положения (поворота) вокруг одной из двух других осей.

Двойную однонаправленную базу можно реализовать:

– плоскостью модели заготовки (рис. 3.22 а);

– осью цилиндра (рис. 3.22 б);

– образующей цилиндра (рис. 3.23 а);

– точками, которые лежат на общей касательной к двум наружным цилиндрам (рис. 3.23 б);

– линией пересечения двух плоскостей (рис. 3.24 а).

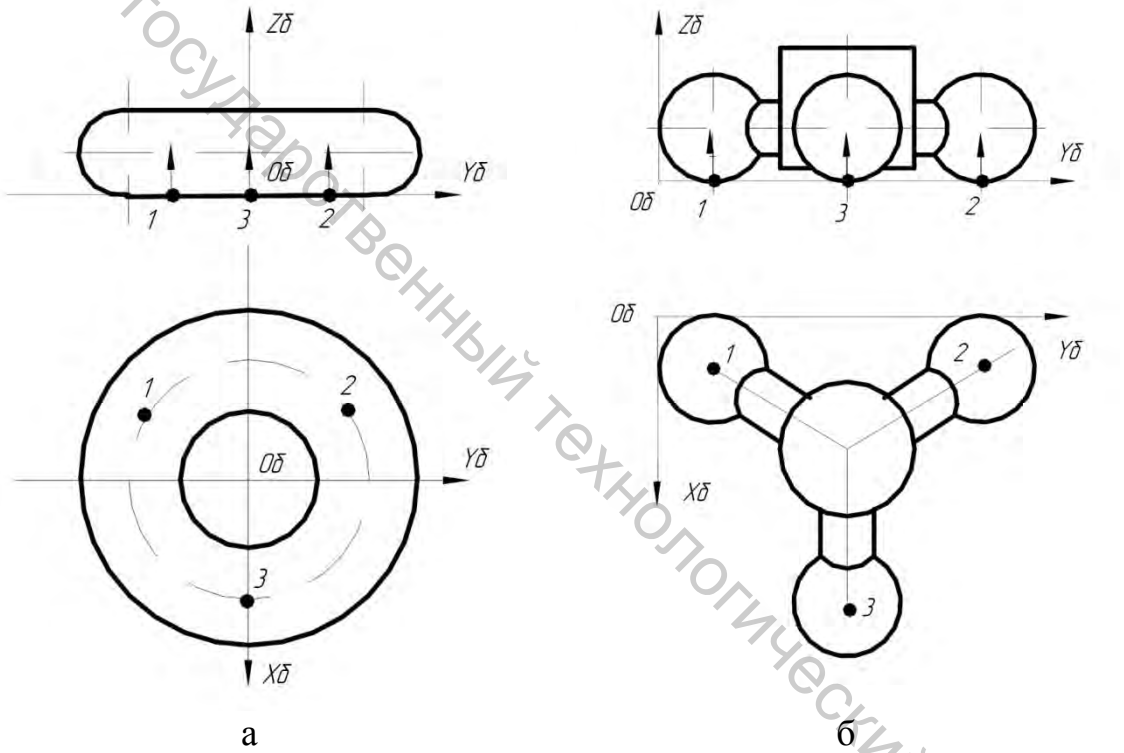


Рисунок 3.21 – Схема реализации тройной однонаправленной базы: а – направляющей тора, б – наружными точками трех сфер, лежащими в одной плоскости

Одиночная (опорная) технологическая база формируется одной точкой сопряжения. Накладывает одну связь – определенность положения обрабатываемого элемента заготовки вдоль направляющего вектора (рис. 3.18).

Одиночная база может быть реализована точкой, лежащей на:

– оси цилиндра, конуса или тора (рис. 3.24 б);

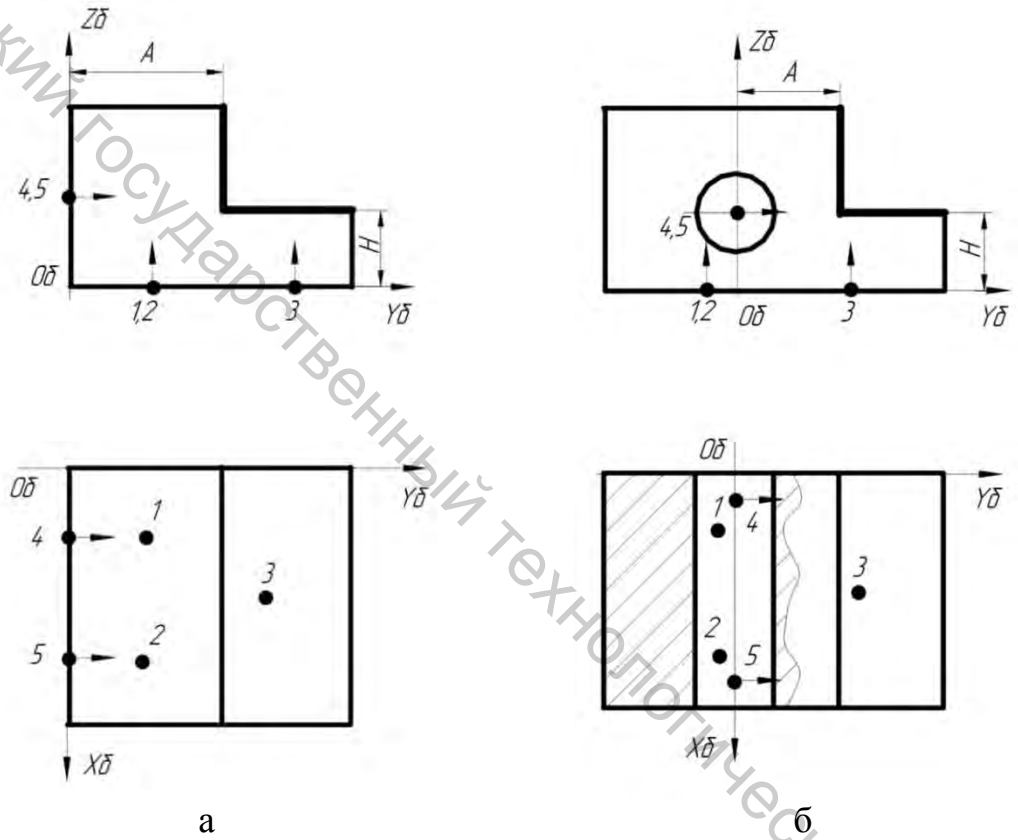
– плоскости геометрической модели заготовки;

– образующей цилиндра;

Витебский государственный технологический университет

– линии пересечения плоскостей и т.д.

С помощью оси цилиндрической или конической поверхности заготовки может быть реализована *двойная разнонаправленная (двойная опорная) технологическая база*, если в одной точке этой оси лежат две слившиеся точки сопряжения, а соответствующие направляющие векторы взаимно перпендикулярны. Эта база накладывает две связи: определенность расстояния обрабатываемого элемента вдоль осей базовой системы координат, параллельных направляющим векторам (рис. 3.17; рис. 3.18 б, г – точки *5,6*; ж – точки *4,6*; к – точки *1,2*;*3,4*;*5,6*).

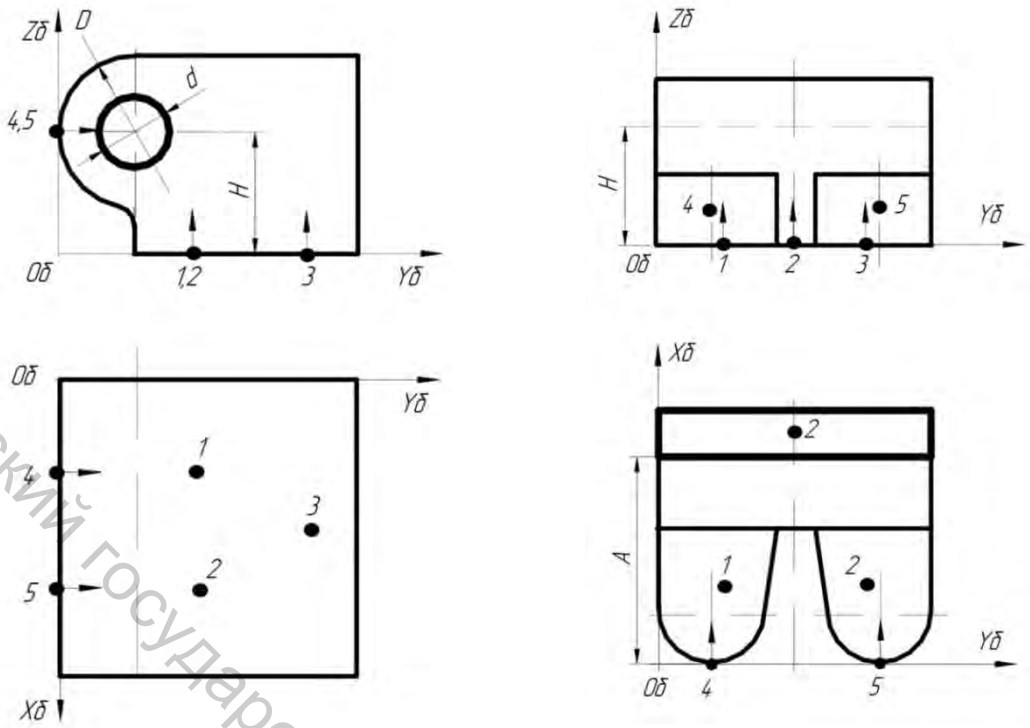


а б

Рисунок 3.22 – Схема реализации направляющей базы с помощью:
а – плоскости, б – оси цилиндра геометрической модели заготовки

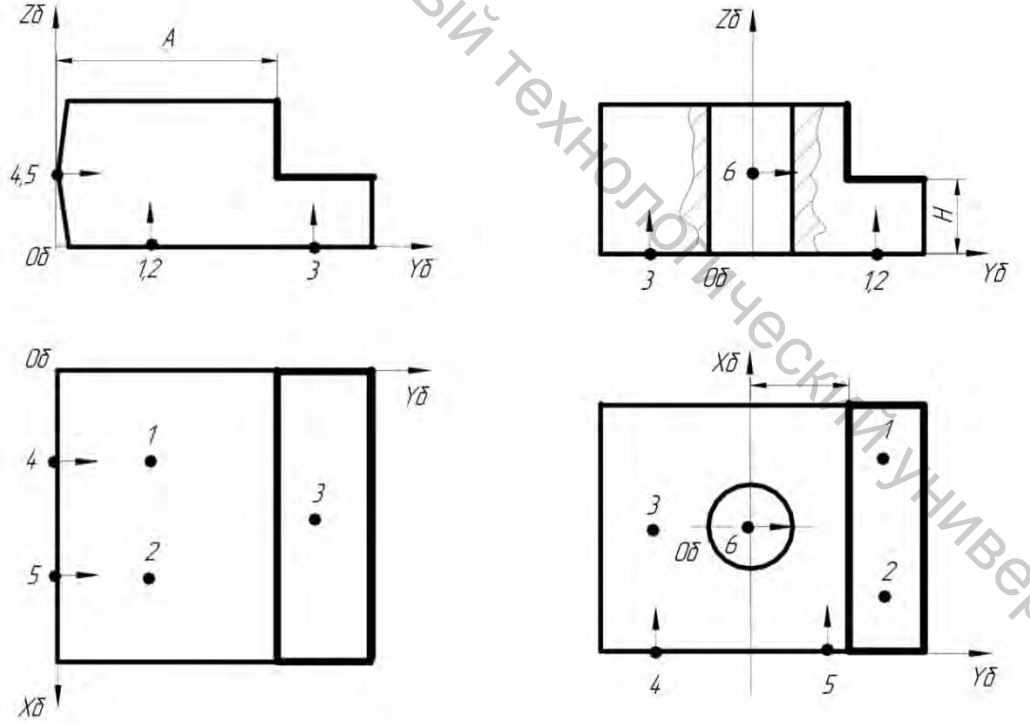
С помощью центра сферической поверхности или точки на оси конической поверхности можно реализовать *тройную разнонаправленную* (*тройную опорную) технологическую базу*, если в центре сферы или в одной из точек оси конуса расположены три слившиеся точки сопряжения, а соответствующие направляющие векторы взаимно перпендикулярны (рис. 3.17; 3.18 д, ж, з – точки *1*,*2*,*3*). Обычно в эту базу помещают начало базовой системы координат. Тройная разнонаправленная (тройная опорная) база накладывает три связи: определенность положения обрабатываемого элемента заготовки вдоль осей БСК.

Витебский государственный технологический университет



а б

Рисунок 3.23 – Схема реализации направляющей базы с помощью:
а – образующей цилиндра, б – образующими двух наружных цилиндров



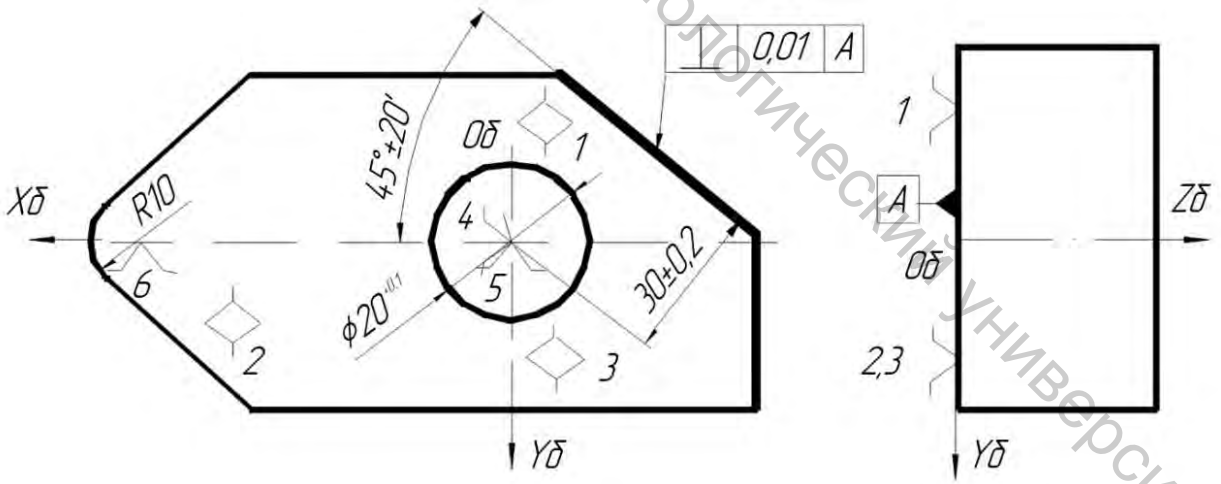
а б

Рисунок 3.24 – Схема реализации направляющей базы с помощью точек, лежащих на:
а – линии пересечения плоскостей, б – опорной базы с помощью точки на оси цилиндра

Витебский государственный технологический университет

С помощью достаточно длинной оси цилиндрической поверхности заготовки можно реализовать *четверную (двойную направляющую) технологическую базу*, если на этой оси расположены четыре попарно слившиеся точки сопряжения, а направляющие векторы, выходящие из каждой пары слившихся точек сопряжения, взаимно перпендикулярны. Можно представить двойную направляющую базу как сочетание двух лежащих на одной оси и перпендикулярных двойных однонаправленных (направляющих) баз или двух лежащих на одной оси двойных разнонаправленных (двойных опорных) баз. Четверная (двойная направляющая) база накладывает четыре связи: определенность расстояния обрабатываемого элемента заготовки вдоль двух осей базовой системы координат (две связи), перпендикулярных оси, которая реализует данную базу, и определенность углового положения (поворота) вокруг этих же осей (еще две связи) (рис. 3.17; рис. 3.18 в, г – точки *1–4*).

На рисунках 3.25 и 3.26 показаны примеры *схемы базирования* заготовки. Состояние заготовки отражается совокупностью размеров и углов, характеризующих положение обработанного конструктивного элемента (в данном случае плоскости, выделенной жирной линией) относительно технологических баз (собственной системы координат). Это расстояние от оси *Zб*, равное 30±0,2 мм, допуск перпендикулярности относительно плоскости *Хб Об Yб* и угол 45º±20’ относительно плоскости *Хб Об Zб*. Острие значка следует направлять в соответствии с направлением направляющего вектора.



условные обозначения направляющих векторов

– на виде сбоку; – в плане

Рисунок 3.25 – Пример схемы базирования

Витебский государственный технологический университет

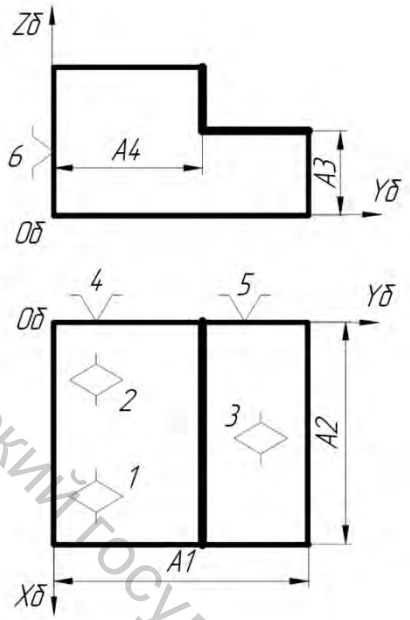


Рисунок 3.26 – Пример схемы базирования

Возможные варианты схем базирования можно условно разделить на четыре класса. Первый класс объединяет варианты схем базирования, в которых главной является тройная однонаправленная (установочная) база. Эта база сочетается в комплекте либо с двойной однонаправленной (направляющей) и одиночной (опорной) (рис. 3.26), либо с двойной разнонаправленной (двойной опорной) и одиночной (опорной) базами (рис. 3.25 и 3.27).

Второй класс объединяет варианты схем базирования, в которых главной является четверная (двойная направляющая) база (ось «длинного» цилиндра). Эта база сочетается в комплект либо с двумя одиночными (опорными) (рис. 3.28), либо с двойной разнонаправленной (двойной опорной) базой.

К третьему классу относятся варианты схем базирования, в которых главной является тройная разнонаправленная (тройная опорная) база. Эта база сочетается в комплекте либо с двойной однонаправленной (направляющей) и одиночной (опорной) базами, либо с двойной разнонаправленной (двойной опорной) и одиночной (опорной) базами, либо с тремя одиночными (опорными) базами (рис. 3.29 и 3.30).

К четвертому классу относятся варианты схем базирования, где нет главной базы, а комплект технологических баз образуется сочетанием трех одинаковых (двойных однонаправленных (направляющих) или двойных разнонаправленных (двойных опорных) (рис. 3.31)) баз.

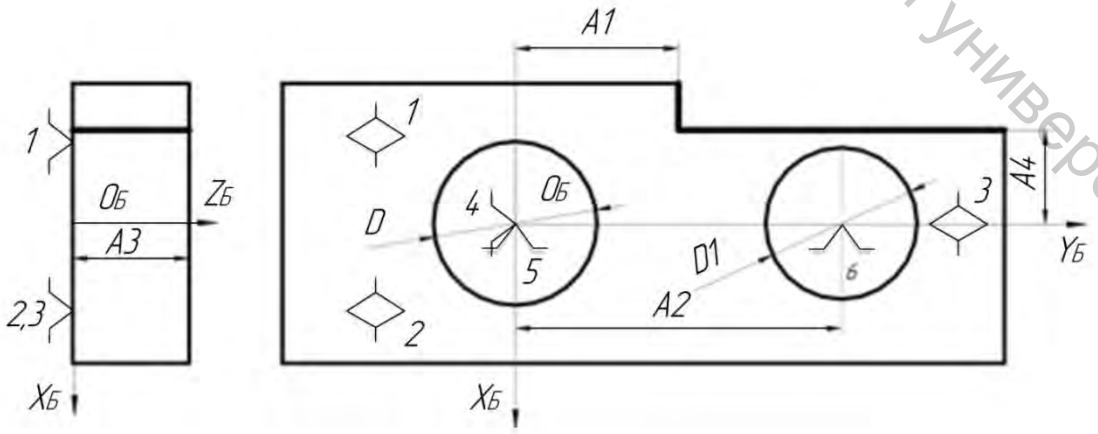


Рисунок 3.27 – Пример схемы базирования первого класса (с двойной *опорной базой)*

Витебский государственный технологический университет

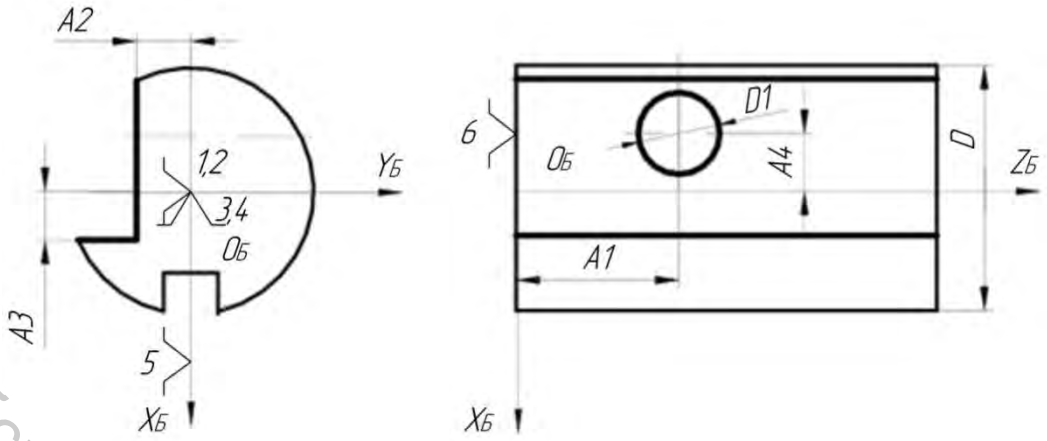


Рисунок 3.28 – Пример схемы базирования второго класса

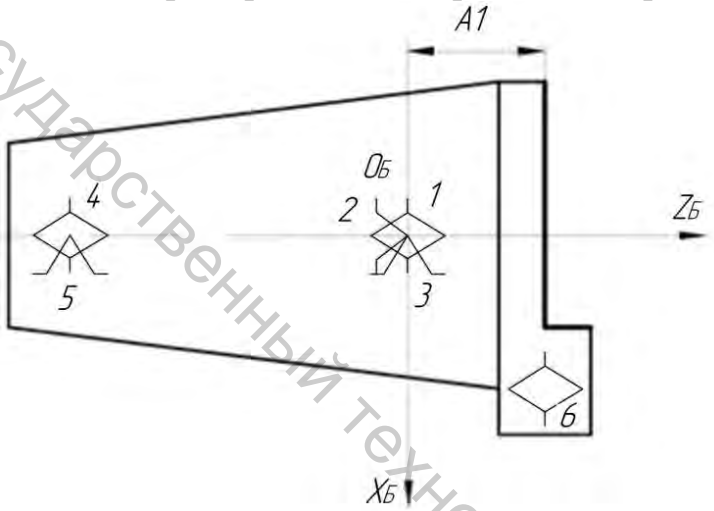


Рисунок 3.29 – Пример схемы базирования третьего класса

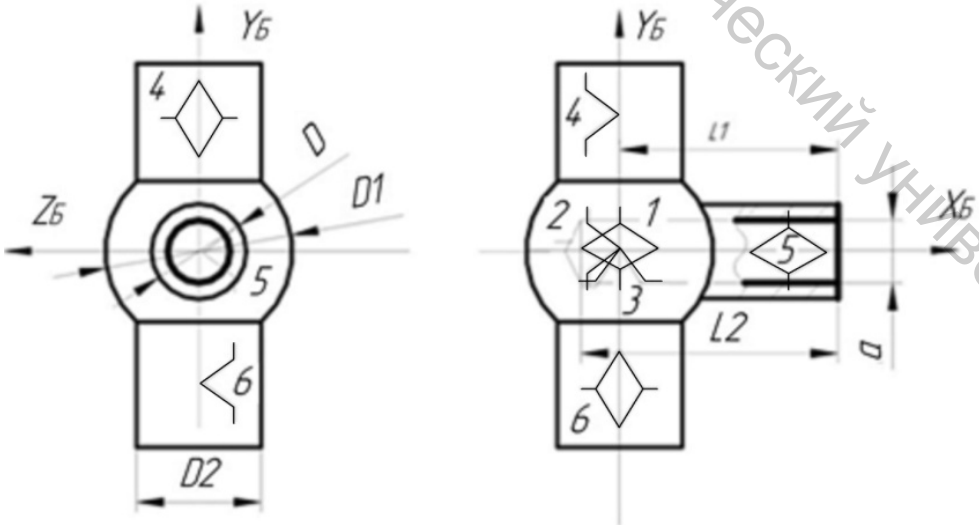


Рисунок 3.30 – Пример схемы базирования третьего класса

Витебский государственный технологический университет

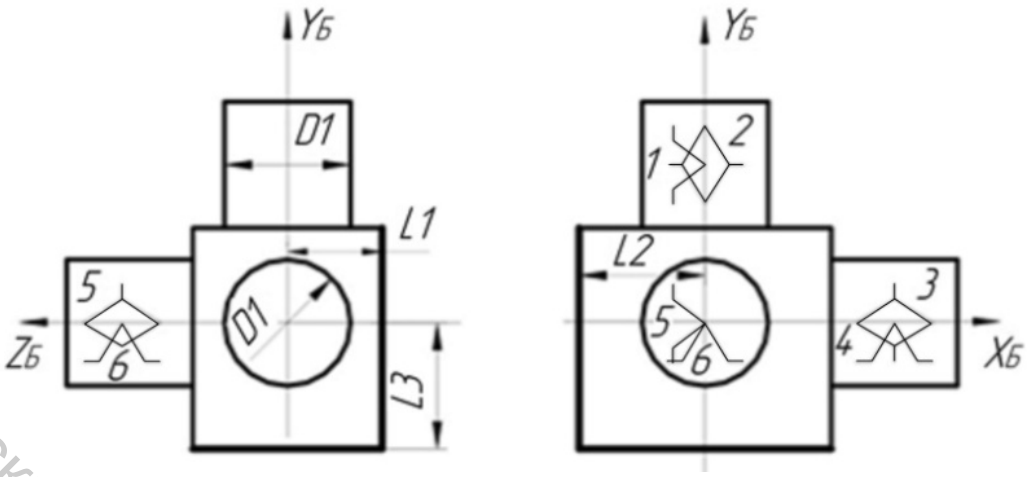


Рисунок 3.31 – Пример схемы базирования четвертого класса

Под *настроечной* базой будем понимать обрабатываемую поверхность, по отношению к которой заданы размеры и (или) относительные повороты другой обрабатываемой поверхности при той же схеме базирования. Первая обрабатываемая поверхность ориентирована относительно технологических баз.

Так, например, при обработке подшипникового гнезда (рис. 3.32) при обработке поверхности *M* настроечной базой является поверхность *K*. При обработке поверхности Р на станке с ЧПУ, оснащенном поворотным столом (рис. 3.33), настроечной базой является поверхность *F*, а при обработке отверстия *G* настроечной базой является поверхность *H* (цепной метод простановки размеров на чертеже).

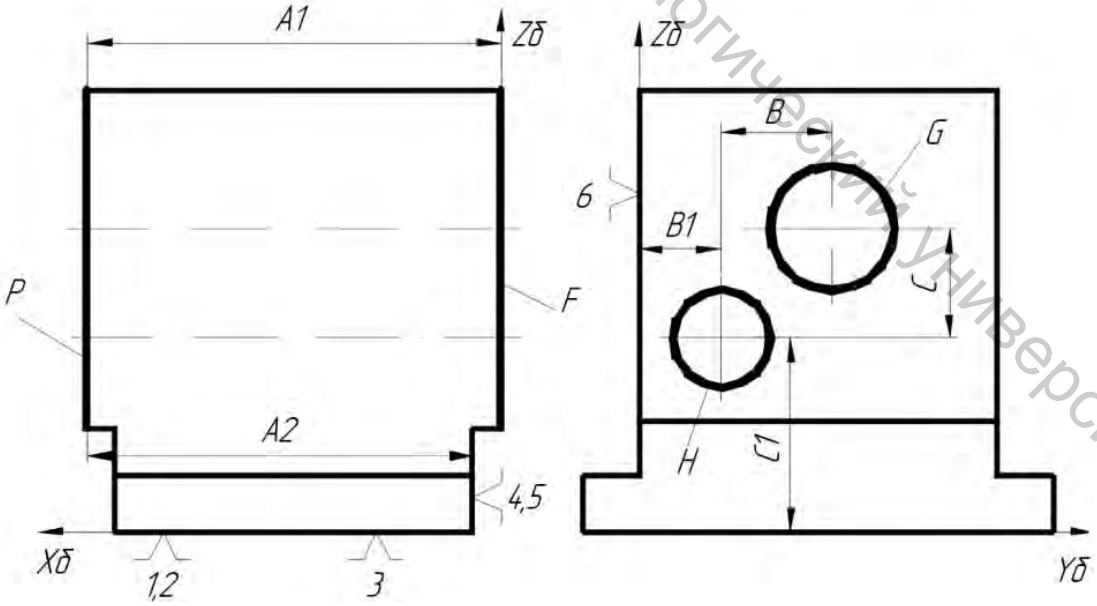


Рисунок 3.32 – Настроечные базы при обработке заготовки на станке с ЧПУ, оснащенном поворотным столом

Витебский государственный технологический университет

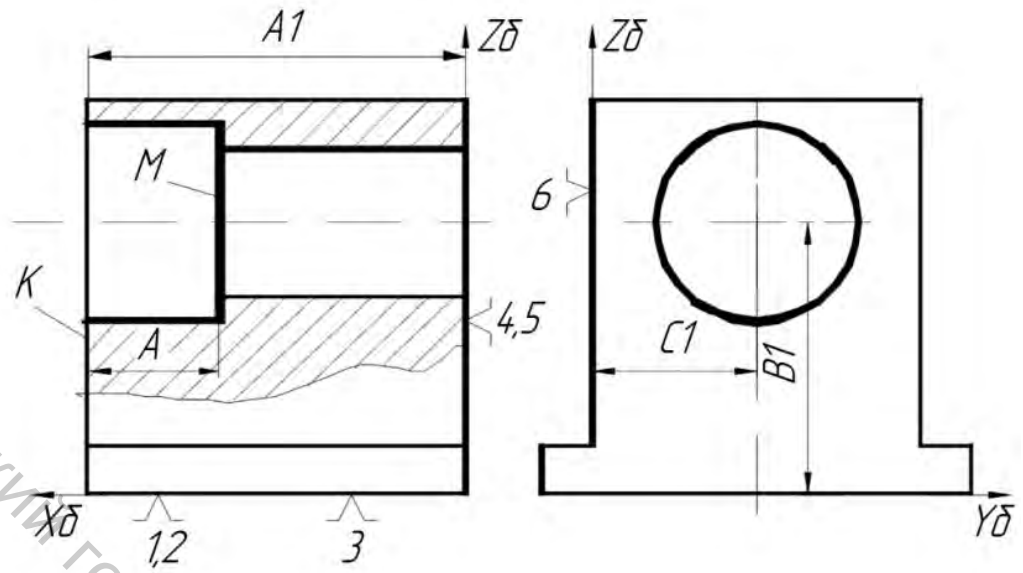


Рисунок 3.33 – Настроечная база при растачивании отверстия

Если от комплекта технологических баз ориентируются две поверхности и расстояния (относительные повороты) до них заданы цепным методом, то поверхность, связанная с технологической базой, и будет являться настроечной базой. Если цепным методом задано несколько поверхностей, то каждая предыдущая поверхность в цепи будет для последующей настроечной базой.

Под теоретической *схемой установки* будем понимать графическое изображение геометрической модели заготовки (абсолютно твердого тела, поверхности которого (в том числе плоскости, оси и центры симметрии) идеальны) в состоянии после выполнения рассматриваемой операции, на которой выделены обработанные поверхности, проставлены обозначения размеров, допусков взаимного расположения и условные обозначения установочно-зажимных элементов приспособления, точки приложения и направления силы закрепления, а также проведена опорная система координат.

На рисунке 3.34 показана *схема установки*, соответствующая схеме базирования, показанной на рисунке 3.25.

Условными знаками обозначены три плоские опоры, с которыми соприкасается установочная база , цилиндрический палец , и подвижная призма согласно ГОСТ 3.1107-81 «Опоры, зажимы, и установочные устройства. Графические обозначения». Сила закрепления, приложенная вблизи обрабатываемой плоскости, направлена на плоские опоры.

Витебский государственный технологический университет

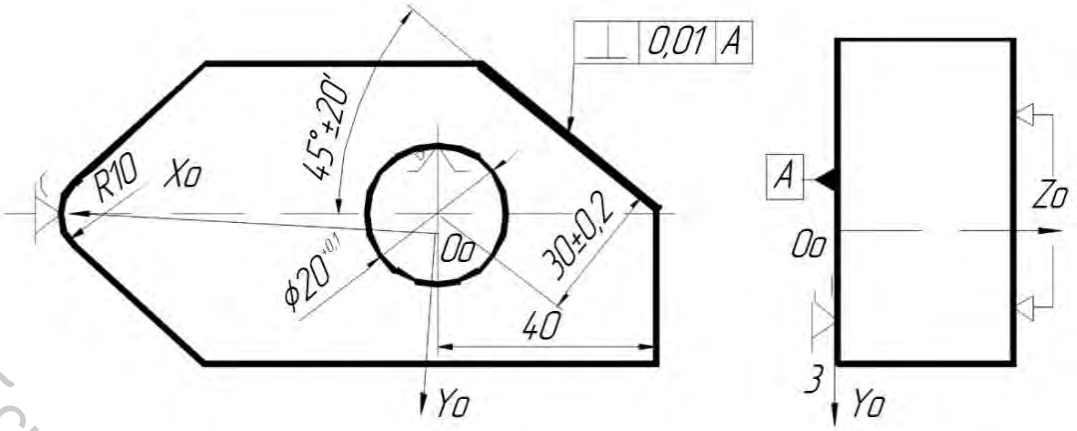


Рисунок 3.34 – Пример схемы установки

В приложении В приведены условные обозначения установочных и зажимных компонентов приспособлений. Причем в приложении установлено соответствие установочного компонента проектной технологической базе. На рисунках 3.35...3.38 приведены примеры схем установки. Следует отметить, что в указанном ГОСТе отсутствует обозначение некоторых современных опор, зажимов и установочных устройств. Так, например, в нем нет обозначений для клиновых оправок, оправок с тарельчатыми пружинами, клиноплунжерных оправок, втулок, полувтулок и др. В приложении В на такие элементы приводятся рекомендуемые обозначения.

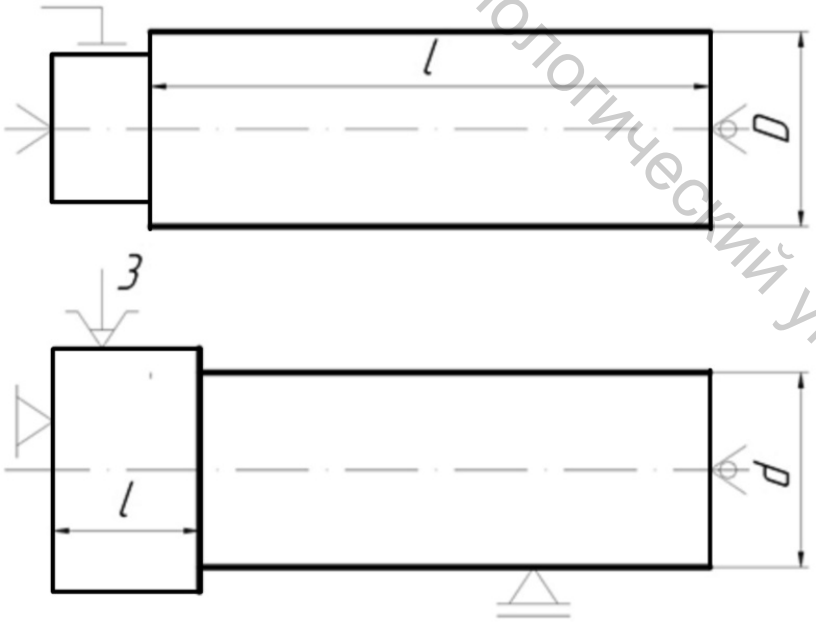


Рисунок 3.35 – Схемы установки цилиндрических заготовок:
а – в центрах и поводковом патроне; б – в трехкулачковом патроне, вращающемся центре и подвижном люнете

Витебский государственный технологический университет

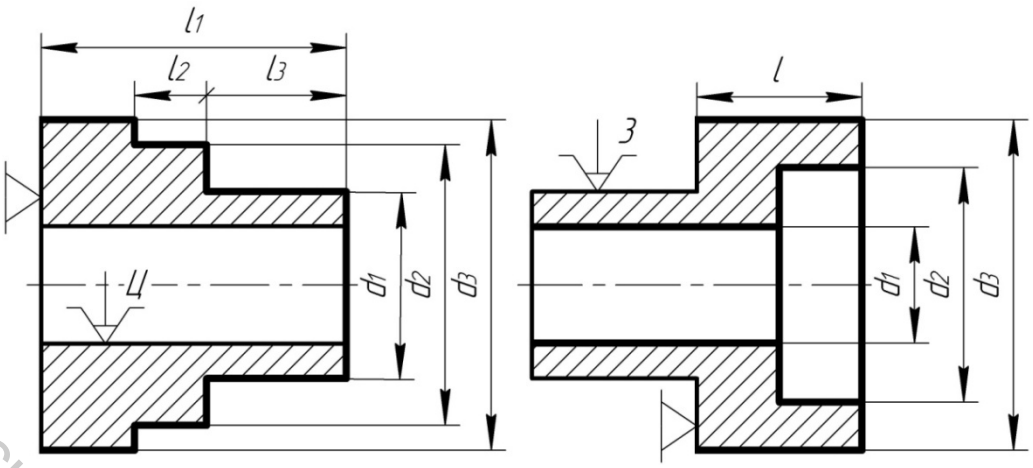


Рисунок 3.36 – Схемы установки цилиндрических заготовок:
а – в цанговой оправке; б – в трехкулачковом патроне

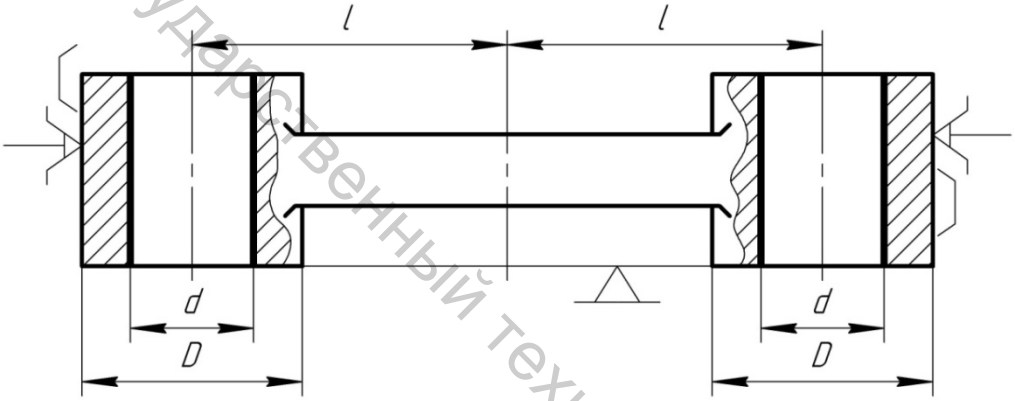


Рисунок 3.37 – Схема установки заготовки в самоцентрирующих тисках
с призматическими губками

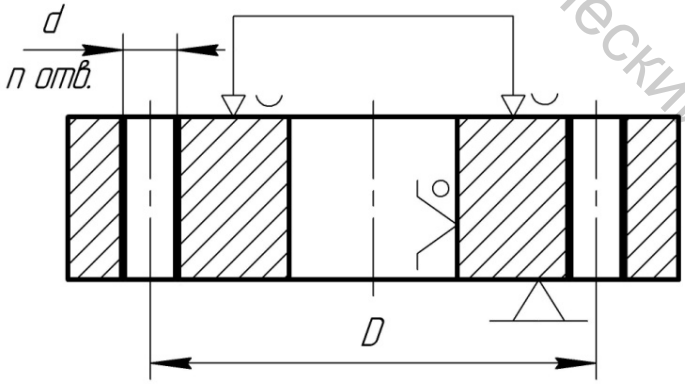


Рисунок 3.38 – Схема установки заготовки на плоскость и
цилиндрический палец

Таким образом, процесс разработки модели установки заготовки предлагается осуществлять в пять этапов:

– определение *комплекта баз ориентации*;

Витебский государственный технологический университет

– разработка *теоретической схемы базирования* (определение числа налагаемых связей);

– разработка *теоретической схемы установки* (выдача задания на проектирование оснастки);

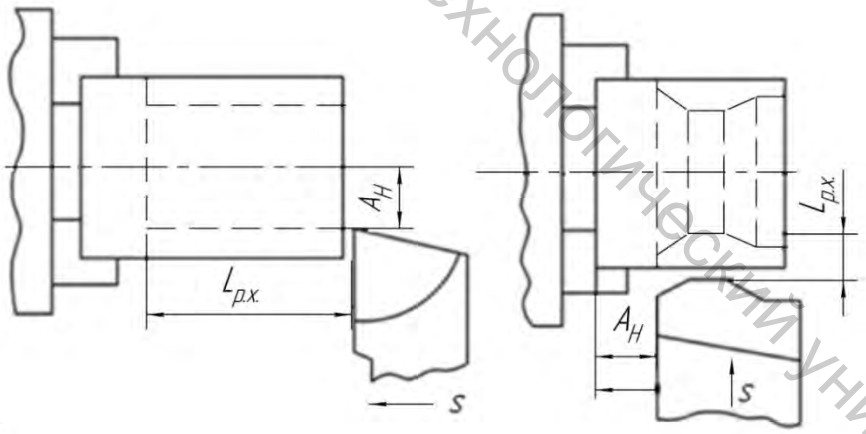
– оценка *погрешности схемы установки* (см. далее);

– разработка (или выбор) *конструктивной модели приспособления*.

При переходе от первого этапа проектирования к последнему происходит наращивание объема информации о реальном процессе установки. Однако никогда модель установки не может быть тождественна реальному процессу, да это и не требуется.

3.3 Размерная настройка

Под размерной настройкой будем понимать ориентацию 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. 3.39).



а б

Рисунок 3.39 – Схема размерной настройки при токарной обработке: а – с продольной подачей $s_{прод}$, б – с поперечной подачей $s_{поп}$, $L_{р.х}$ – длина рабочего хода, $A_н$ – размер настройки

Наиболее простым методом размерной настройки является настройка по эталону (рис. 3.40). Чтобы повысить точность настройки и не повредить режущую кромку инструмента *3* при его подводе к эталону *2*, применяют промежуточный элемент щуп *4* заданной толщины.

Витебский государственный технологический университет

Тогда размер эталона (расстояние от установочного элемента) определяется из выражения

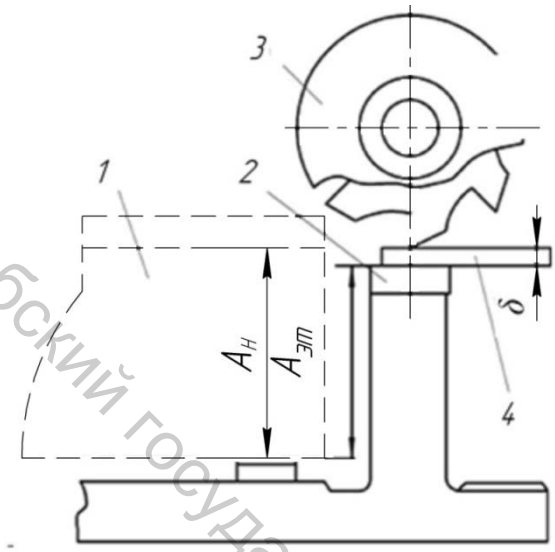


Рисунок 3.40 – Схема размерной настройки по эталону

$$A_{эт} = A_н - b,$$

где $A_{эт}$ – размер (высота) эталона, $A_н$ – размер настройки.

В некоторых случаях в качестве начала отсчета при размерной настройке используется технологическая база. Пример такой настройки показан на рисунке 3.41. 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 (растачиваемого) 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.

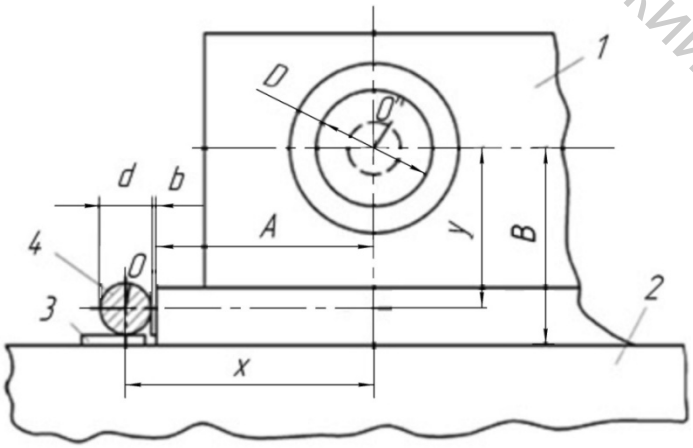


Рисунок 3.41 – Схема настройки на размеры А и В от технологических баз с помощью шкал и лимбов приводов перемещений горизонтально-расточного станка для растачивания отверстия

Витебский государственный технологический университет

Пример настройки при обработке отверстия, расположенного под углом к оси другого отверстия, показан на рисунке 3.42. 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 α по отношению к оси шпинделя. Ось шпинделя (при помощи индикатора) устанавливается в нуль относительно шарика оправки. Затем осуществляется отвод стола на расстояние *x*, где

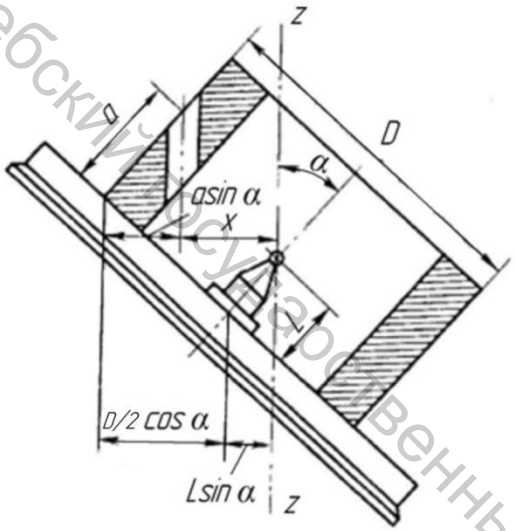


Рисунок 3.42 – Схема настройки для обработки под углом α на расстоянии а

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

При размерной настройке резцов в расточных борштангах применяют эталоны или приборы типа «наездник» (рис. 3.43). Прибор 1, оснащенный индикатором 3 часового типа, настраивается предварительно по изготовленной для этой цели втулке с наружным диаметром $d = 2 \cdot A_н$. 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.

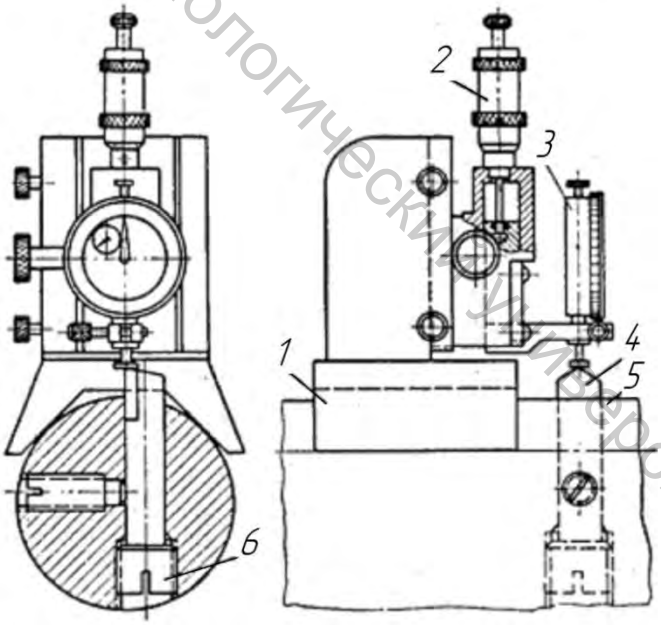


Рисунок 3.43 – Схема настройки резца на размер растачиваемого отверстия

Некоторые станки с ЧПУ снабжены измерительными преобразователями 2 (рис. 3.44), которые позволяют осуществить размерную настройку. Для этого каждый из инструментов 1 подводится к измерительному преоб-

Витебский государственный технологический университет

разователю 2, который устанавливается на столе станка или на приспособлении с известной высотой $B_н$. Система ЧПУ переводится в режим измерения. При отводе шпиндельной бабки в исходное положение системой определяется расстояние $C_н$, а следовательно, и $A_и$ от стола до инструмента. Таким образом, в памяти УЧПУ формируется необходимое перемещение $z = A_и - A_н$ для выхода на размер настройки $A_н$.

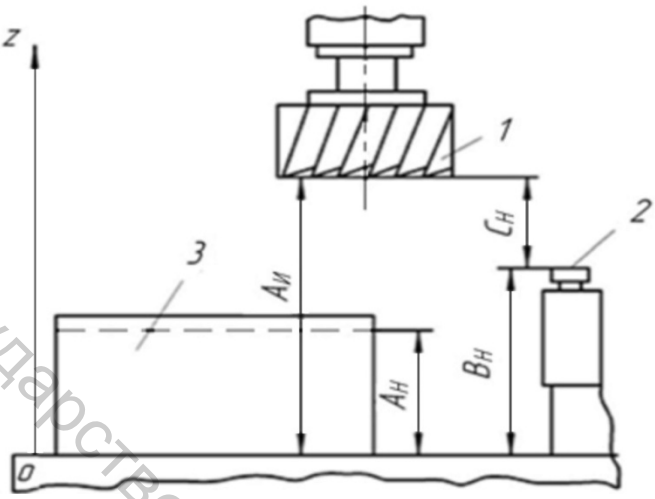


Рисунок 3.44 – Схема размерной настройки инструментов многоцелевого станка с ЧПУ по оси Z

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 $A_{факт}$ никогда не равен размеру настройки $A_н$. 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 3.45.

После включения вращения шпинделя вершина резца переводится из исходного положения (точка 0) до касания с заготовкой (в точке 1).

Витебский государственный технологический университет

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 точку 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.

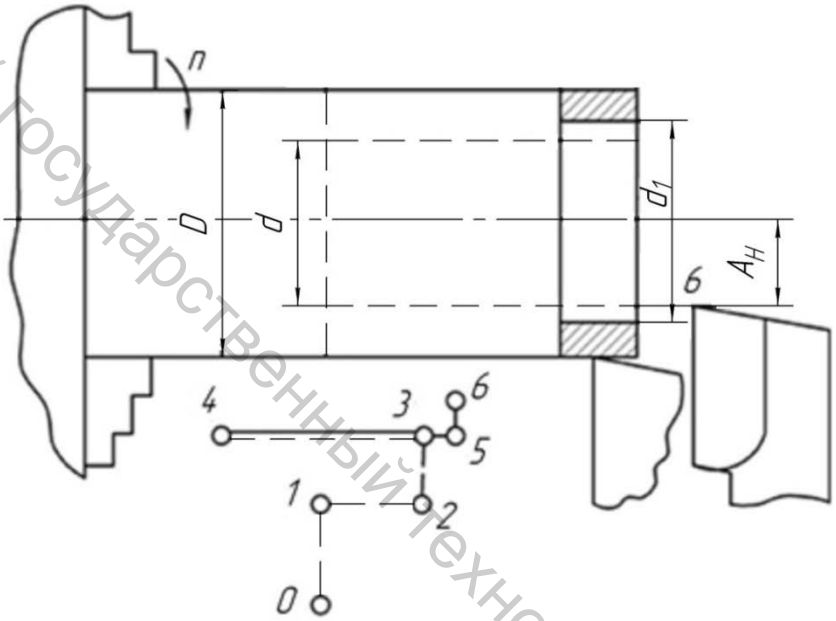


Рисунок 3.45 – Схема размерной настройки методом «пробной стружки»

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

Витебский государственный технологический университет

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).

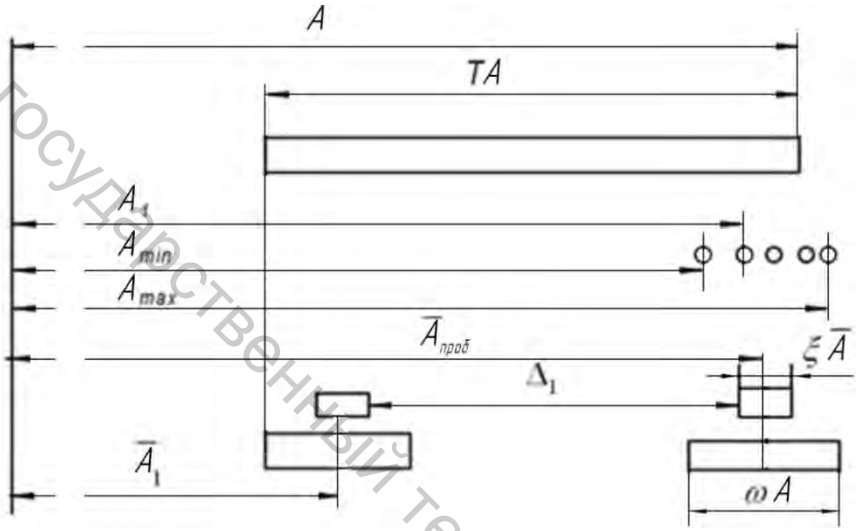


Рисунок 3.46 – Схема определения и смещения мгновенного поля рассеяния при размерной настройке на партию

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 ωA размера A, чтобы получать максимальный запас $h_и$ на изнашивание инструмента.

На рисунке 3.46 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

$$A_{ср} = (\sum_{i=1}^{m} A_i)/m,$$

Витебский государственный технологический университет

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

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

$$\xi \overline{A} = K_1 \cdot \omega A / \sqrt{m'}, \tag{4.1}$$

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 3.46 необходимая коррекция, при условии, что по мере изнашивания инструмента размер обработки увеличивается, определяется из следующего выражения

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

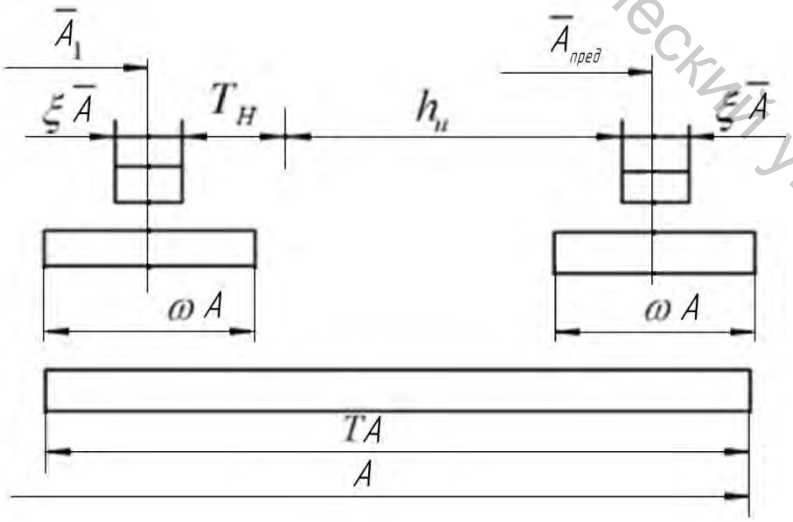


Рисунок 3.47 – Схема смещения мгновенного поля рассеяния при износе инструмента

Витебский государственный технологический университет

Полученный уровень настройки характеризуется параметром $\overline{A}_1$, 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 $K_н$:

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

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

По мере изнашивания инструмента уровень настройки будет смещаться от $\overline{A}_1$ до предельного значения $\overline{A}_{пред}$ (рис. 3.47). С учетом допуска $T_н$ на размерную настройку запас допуска $h_и$ на изнашивание определяется следующим выражением

$$h_и = TA - T_н - \omega A - \xi \overline{A}.$$

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

$$\tau_н = B_0 T_Н^{-b},$$

где B_0 – коэффициент; b = 0,65...0,75. Однако при этом увеличение $T_н$ 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.

3.4 Размерные цепи при сборке и механической обработке

Размерные связи между исполнительными поверхностями машины и ее механизмов образуются с помощью размеров, принадлежащих сборочным единицам и деталям, которые сопрягаются по основным и вспомогательным базам. То же можно сказать об относительных поворотах [2–5, 84–86]. На рисунке 3.48 показана схема формирования расстояния $A_Д$ между осью шпинделя силовой головки *1* и установочной поверхностью приспособления *2*. Это расстояние формируется с помо-

Витебский государственный технологический университет

щью размеров $A_1 \ldots A_4$. Аналогично формируется параллельность оси шпинделя силовой головки *3* по отношению к другой установочной поверхности приспособления (α_Δ зависит от углов $\alpha_1 \ldots \alpha_5$).

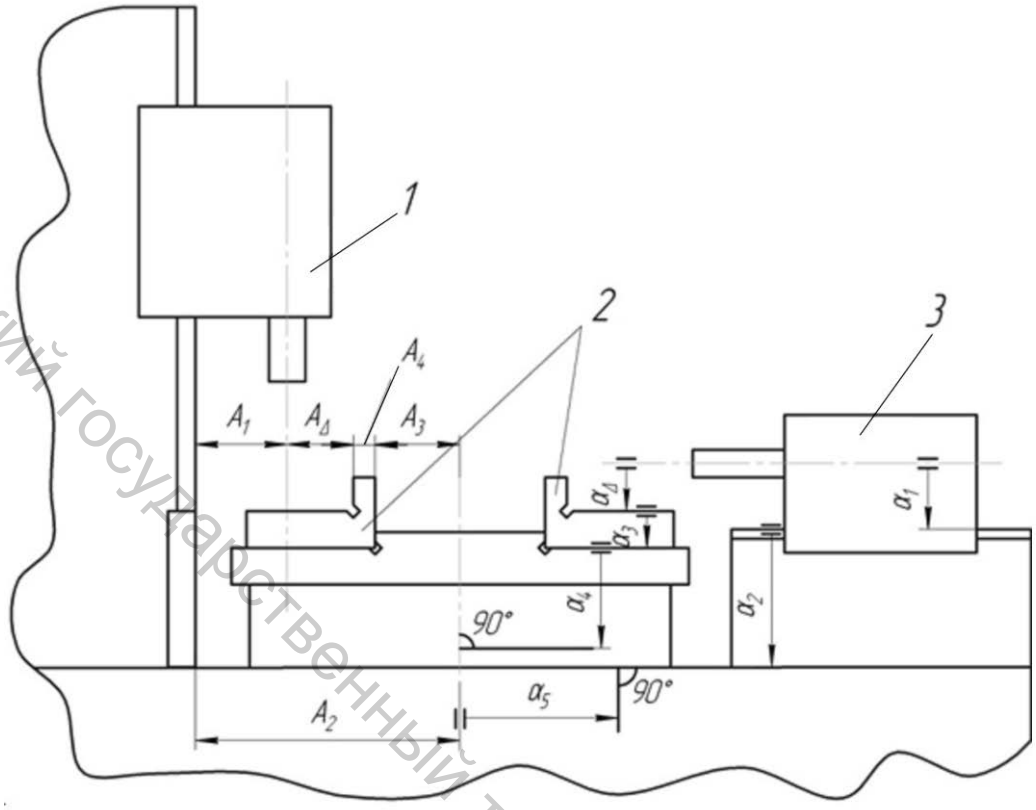


Рисунок 3.48 – Схема размерных связей агрегатного станка

В общем случае расположенные последовательно по замкнутому контуру размеры (относительные повороты) принято называть *размерной цепью.* Под *сборочной размерной цепью* понимают замкнутую последовательность векторов, выражающих размеры сопрягаемых деталей (сборочных единиц), входящих в состав проектируемой станка (или проверяемой размерным расчетом) машины (сборочной единицы) и оказывающих влияние на ее функционирование.

Сборочная размерная цепь состоит из составляющих звеньев и замыкающего (исходного) звена. *Составляющие звенья* размерной цепи – это размеры (относительные повороты), принадлежащие элементам машины (сборочной единицы). *Замыкающее звено* – это размер (угол относительного поворота), который принадлежит не элементу машины (сборочной единицы), а машине (сборочной единице) в целом. Этот размер (угол относительного поворота) является основной геометрической характеристикой машины (сборочной единицы), позволяющей оценивать точность и надежность ее функционирования. Сказанное относится к параметрам A_Δ и α_Δ на рисунке 4.46.

Витебский государственный технологический университет

Любая размерная цепь расстояний может быть отнесена к одному из следующих видов: линейные, плоские и пространственные. У *линейной размерной цепи* все звенья выражены в линейных единицах и параллельны. У *плоской размерной цепи* одно или несколько составляющих звеньев не параллельны замыкающему звену. Звенья *пространственной размерной цепи* расположены в пространстве. Но путем проецирования на координатные оси можно плоскую размерную цепь привести к одной или двум линейным, а пространственную – к нескольким связанным между собой плоским. Рассмотренные размерные цепи (расстояний) показаны на рисунке 3.49. Уравнение линейной цепи с учетом направлений векторов в данном случае имеет вид

$$A_{\Delta} = A_1 + A_2 + A_3 - A_4 .$$

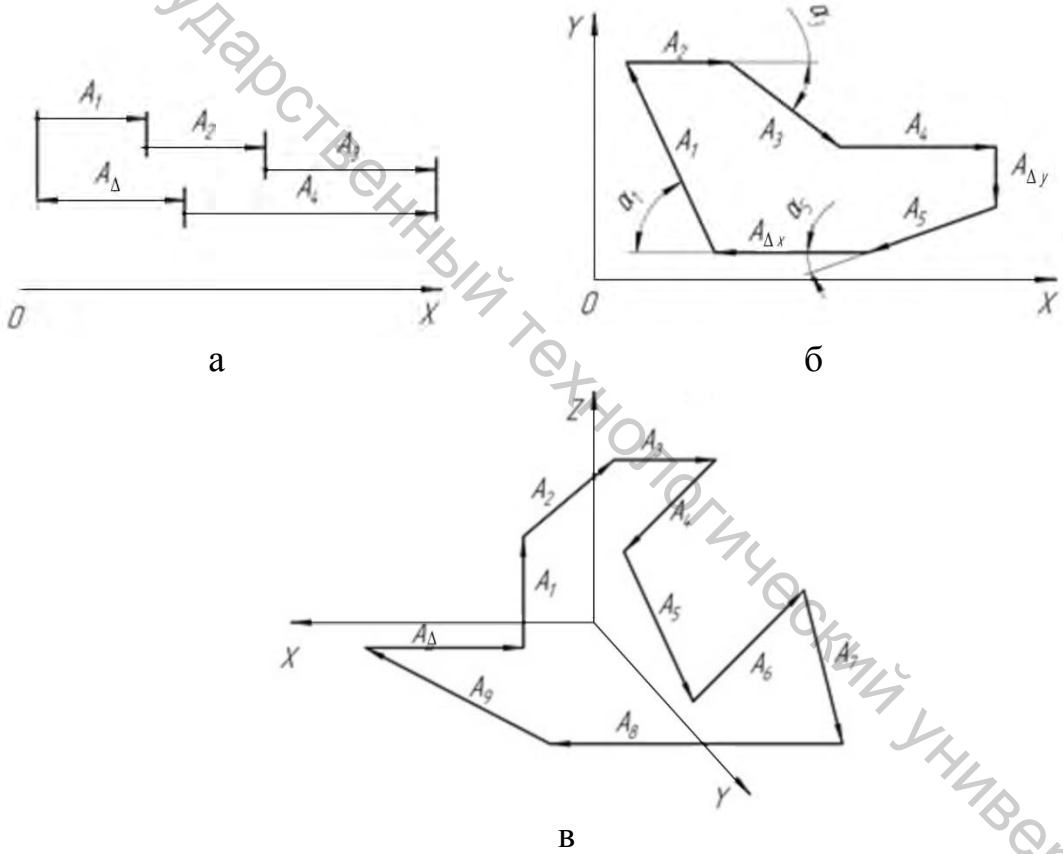


Рисунок 3.49 – Схемы размерных цепей:
а – линейной, б – плоской, в – пространственной

Обход контура при построении размерной цепи лучше начинать с замыкающего звена, выбирая его направление противоположным направлению оси *X*. Максимальное поле рассеяния ω_{Δ} замыкающего

Витебский государственный технологический университет

звена A_Δ можно легко определить, придав составляющим звеньям максимальные и минимальные значения. Тогда

$$\omega_\Delta = \sum_{i=1}^{n-1} \omega_i \quad ,$$

где n – количество звеньев размерной цепи; ω_i – поле рассеяния i-го составляющего звена.

Уравнения плоской размерной цепи, показанной на рисунке 3.49 б, имеют вид:

$$A_{\Delta x} = A_1 \cos\alpha_1 + A_2 + A_3 \cos\alpha_3 + A_4 - A\cos\alpha_5 ,$$
$$A_{\Delta y} = A_1 \cos\alpha_1 - A_3 \cos\alpha_3 - A_5 \cos\alpha_5 .$$

Эти уравнения не являются линейными, и максимальные значения полей рассеяния зависят не только от погрешностей линейных звеньев, но и от погрешности углов.

Линейная цепь относительных поворотов, показанная на рисунке 3.50, связывает между собой отклонения от параллельности. Поскольку эти параметры характеризуются соответствующими полями рассеяния, то уравнение размерной цепи можно записать по аналогии с предыдущим уравнением.

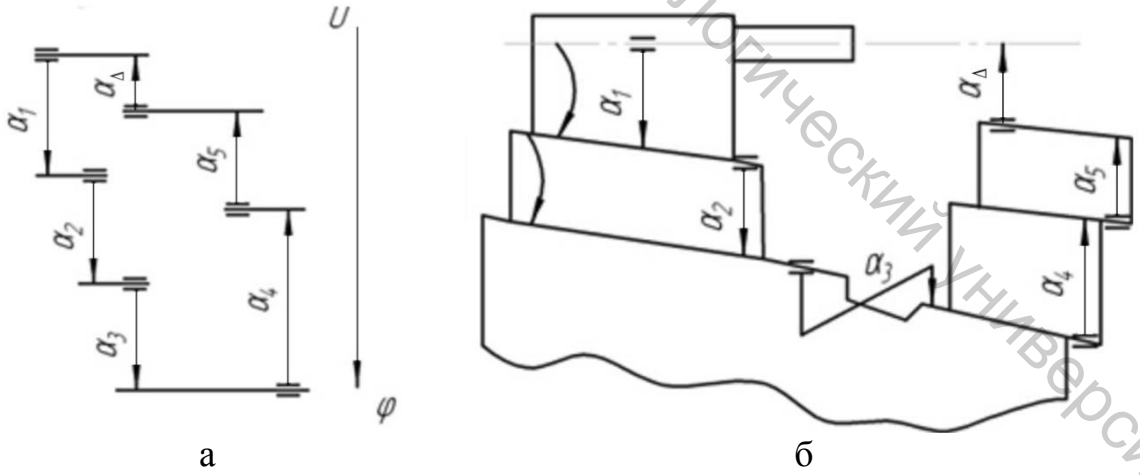


Рисунок 3.50 – Схемы линейной цепи и соответствующая ей схема сборочной единицы машины

Вероятность появления максимального (или минимального) отклонения замыкающего звена очень мала, так как это возможно лишь при условии, что все составляющие звенья одновременно примут со-

Витебский государственный технологический университет

ответствующие крайние значения. Например, вероятность того, что в сборочной единице из пяти деталей размеры всех примут крайние (в пределах 5 % поля допуска) значения, будет равна 0,0000003.

Из математической статистики известно, что при заданной доверительной вероятности *P* поле рассеяния случайной величины (в нашем случае погрешность звена размерной цепи ω_i) связано со стандартным отклонением σ_i, а следовательно, и с дисперсией D_i, следующим равенством: $\omega_i = \lambda_i \sigma_i$ где λ_i – коэффициент, зависящий от закона распределения; $\sigma_i^2 = D_i$. С другой стороны, если некоторая случайная величина является суммой других случайных величин, то дисперсия суммы равна сумме дисперсий. На этом основании можно записать для линейной размерной цепи:

$$\omega_\Delta = \lambda_\Delta \sqrt{\sum_{i=1}^{n-1} \left(\frac{\omega_i}{\lambda_i} \right)^2} .$$

Конструкторские размерные цепи применяются при проектировании машин и технологической оснастки к металлообрабатывающему оборудованию. *Технологические размерные цепи* связывают размеры обрабатываемой заготовки на разных стадиях технологического процесса и размеры готовой детали. Пример формирования технологической размерной цепи приведен на рисунке 3.51. На этом рисунке показаны: заготовка (б), готовая деталь (а) с размерами, параллельными оси *Y,* операционные эскизы со схемой базирования и размерная цепь, включающая размеры заготовки (*3*), детали *(A)* и технологические (операционные) размеры (*C*). На первой операции выполняют сверление и зенкерование фаски, затем после термической обработки (операция 2) последовательно шлифуют основание (операция 3) и верхнюю плоскость (операция 4) заготовки. Технологические размеры откладываются только от соответствующей базы. Замыкающим звеном в данном случае является размер A_2, а уравнение размерной цепи имеет вид (обход цепи начинается с точки *m)*

$$-C_2 + C_3 - A_2 - C_1 + Ç = 0$$

или

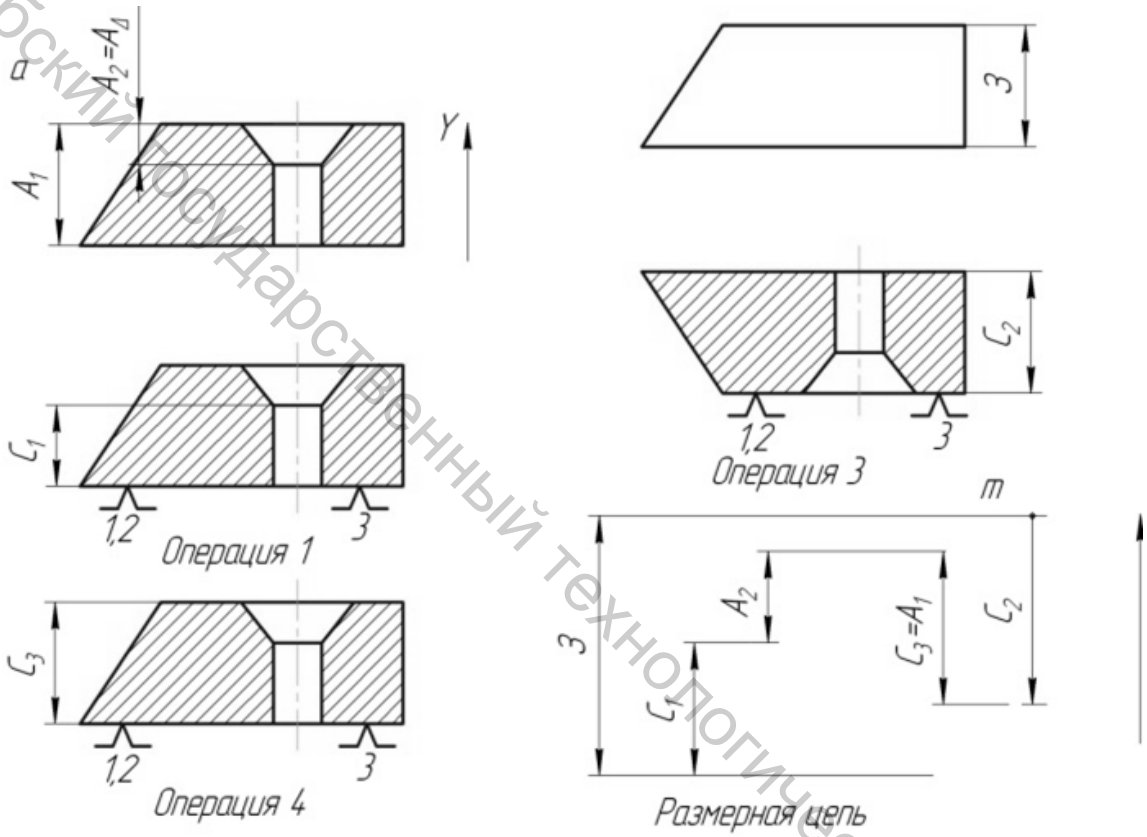
$$A_2 = Ç + C_3 - C_1 - C_2 .$$

Витебский государственный технологический университет

Уравнение для определения максимального поля рассеяния замыкающего звена имеет вид

$$\omega A_2 = \omega Ç + \omega C_3 - \omega C_1 - \omega C_2 .$$

Высокой точности замыкающего звена в данном случае достигнуть нельзя, так как ωA_2 зависит от погрешности заготовки и суммы погрешностей технологических размеров.



а б

Рисунок 3.51 – Формирование технологической размерной цепи

Повысить точность замыкающего звена технологической цепи можно, сократив число ее звеньев. Для этого следует поменять порядок шлифования поверхностей (рис. 3.52). В данном случае размеры *3* и C_3 не входят в размерную цепь и $\omega A_2 = \omega C_1 + \omega C_2$.

В технологии машиностроения используются следующие методы обеспечения заданной точности замыкающего звена размерной цепи: метод полной взаимозаменяемости; метод неполной (частичной) взаимозаменяемости; методы технологической компенсации; методы конструкторской компенсации (имеются в виду методы компенсации погрешностей составляющих звеньев размерной цепи).

Витебский государственный технологический университет

Выбор того или иного метода обусловлен требованиями к точности замыкающего звена, особенностями конструкции сборочной единицы (машины), технологией сборки и механической обработки, типом производства. Критерий выбора – минимизация суммарных затрат на изготовление деталей и сборку машины.

При сборке *методом полной взаимозаменяемости* детали, входящие в комплект сборочной единицы, отбираются из соответствующих совокупностей случайным образом. Замена в комплекте детали данного наименования любой другой того же наименования не должна приводить к выходу замыкающего звена за пределы допуска. Чтобы такое было возможно, необходимо выполнять следующее неравенство:

$$\omega_{\Delta} > \sum_{i=1}^{n-1} \omega_i .$$

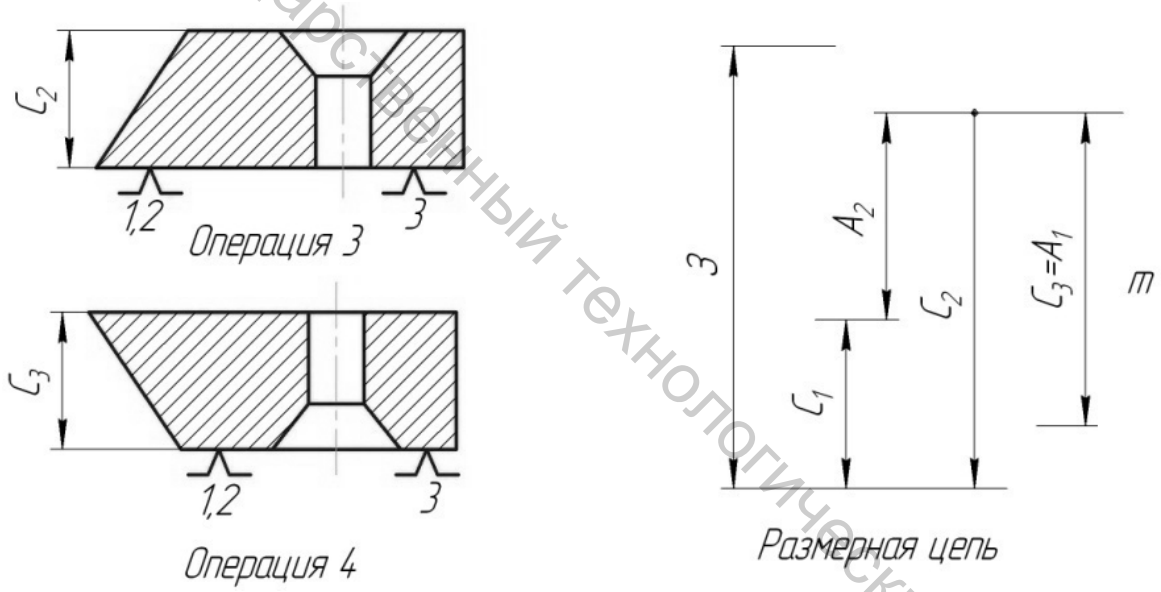


Рисунок 3.52 – Схема сокращения числа звеньев технологической размерной цепи

Если в пределе считать, что максимальное поле рассеяния равно полю допуска, то для линейной цепи

$$TA_{\Delta} > \sum_{i=1}^{n-1} TA_i .$$

Недостатком данного метода является необходимость высокой точности обработки деталей по тем размерам, которые являются составляющими звеньями размерной цепи. Это требование ужесточается при

Витебский государственный технологический университет

увеличении числа звеньев размерной цепи. Поэтому метод полной взаимозаменяемости применяется в массовом производстве при сборке изделий средней точности.

При механической обработке метод полной взаимозаменяемости имеет смысл в том случае, когда требуемый размер обработки обеспечивается за счет формообразующего размера режущего инструмента, например сверл, зенкеров, разверток, протяжек, дисковых фрез и т.д.

Комплектование деталей для сборки *методом неполной взаимозаменяемости* осуществляется так же, как при использовании метода полной взаимозаменяемости. Однако поскольку вероятность максимального отклонения размера замыкающего звена мала, то ограничивающее неравенство следует получать на основании выражения (4.7) с учетом допустимого процента риска сборки единиц, в которых размер замыкающего звена вышел за пределы допуска:

$$TA_{\Delta} > t(\alpha)\sqrt{\sum_{i=1}^{n-1}\frac{TA_i^2}{\lambda_i^2}},$$

где *t(a)* зависит от допустимого процента риска следующим образом:

a, %.....	0,1	0,27	1	2	3	4
t(α)……..	3,290	3,0	2,576	2,326	2,170	2,054

а λ_i – статистические коэффициенты, зависящие от закона распределения погрешности *i*-го звена; для закона нормального распределения $\lambda_i^2 = 9$, для закона равной вероятности $\lambda_i^2 = 3$.

Приведенное неравенство можно использовать, если $n \geq 4$ (погрешности составляющих звеньев распределены по нормальному закону) или $n \geq 7$ (погрешности составляющих звеньев распределены по закону, близкому к равной вероятности). Это неравенство показывает, что использование метода неполной взаимозаменяемости позволяет расширять поле допусков на составляющие звенья по сравнению с требованиями метода полной взаимозаменяемости.

Методы технологической компенсации включают: метод групповой взаимозаменяемости, метод подбора и метод пригонки.

В случаях сборки *методом групповой взаимозаменяемости* детали перед комплектованием в сборочную единицу сортируют на группы по размерам, а само комплектование проводят в соответствии с определенным правилом. Чаще всего номера комплектов совпадают с номерами групп размеров. Это обычное, но не обязательное правило. Метод применяется в условиях массового производства, но когда невозможно

Витебский государственный технологический университет

технически и технологически обеспечить условия полной и неполной взаимозаменяемости. Он дает возможность существенно расширить допуски на составляющие звенья и таким образом значительно снизить затраты на изготовление деталей. Однако при этом эффективность метода несколько снижается в связи с необходимостью ужесточать требования к точности формы сопрягаемых поверхностей и вместо уровня А (нормальная геометрическая точность) использовать уровень В или С (повышенной или высокой геометрической точности). В первом случае (уровень А) погрешность формы может составлять 30 % допуска на размер, а при уровнях В и С – соответственно 20 и 12 %.

Кроме того, использование метода групповой взаимозаменяемости ведет к существенному увеличению незавершенного производства. Причиной этого являются погрешности уровня настройки и неодинаковость параметров закона распределения размеров деталей разных наименований, приводящие к образованию совокупности деталей, из которых невозможно составить комплект. Количество комплектов будет соответствовать минимальному количеству деталей данного наименования, попавших при сортировке в данную группу. С учетом незавершенного производства приходится регулировать уровень размерной настройки.

Рассмотрим задачу сортировки деталей для случая трехзвенной размерной цепи. Это наиболее распространенный случай, когда необходимо обеспечить заданную посадку в соединении (рис. 3.53 а), где *A* – размер отверстия, *B* – размер вала, *TA* и *TB* – соответственно допуски на эти размеры. Для решения задачи нужно определить количество *N* групп, на которые будут разбиты допуски *TA* и *TB,* чтобы при сборке деталей с одинаковыми номерами групп был обеспечен средний зазор (натяг) $\bar{z}$ с допуском $Tz = z_{\max} - z_{\min}$. Кроме того, необходимо определить номинальный (наибольший) размер вала. В соответствии со схемой, приведенной на рисунке 3.53 б, построена размерная цепь (рис. 3.54 а), уравнение которой имеет вид

$$TA + z_{\min} + TB_i - TB + TB_i - z = 0.$$

Подставив в это уравнение $TB_i = \dfrac{TB}{N}$ и $z_{\min} - z_{\max} = TB_z$, получим

$$N = \frac{2TB}{T_z - (TA - TB)}.$$

Витебский государственный технологический университет

Из данного выражения следует, что метод групповой взаимозаменяемости возможен, если $T_z > (TA - TB)$, а минимальное число групп получается при $TA = TB$.

В соответствии с размерной цепью, показанной на рисунке 3.54 б, имеем

$$B = A - \bar{z} + 0{,}5(TA + TB).$$

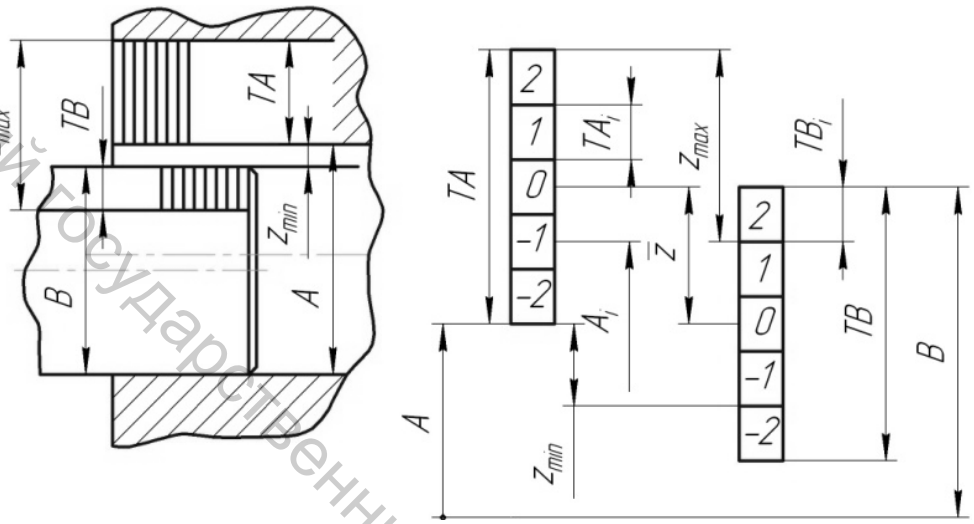


Рисунок 3.53 – Схемы соединения «вал-втулка» и разбивки допусков размеров вала и отверстия на группы

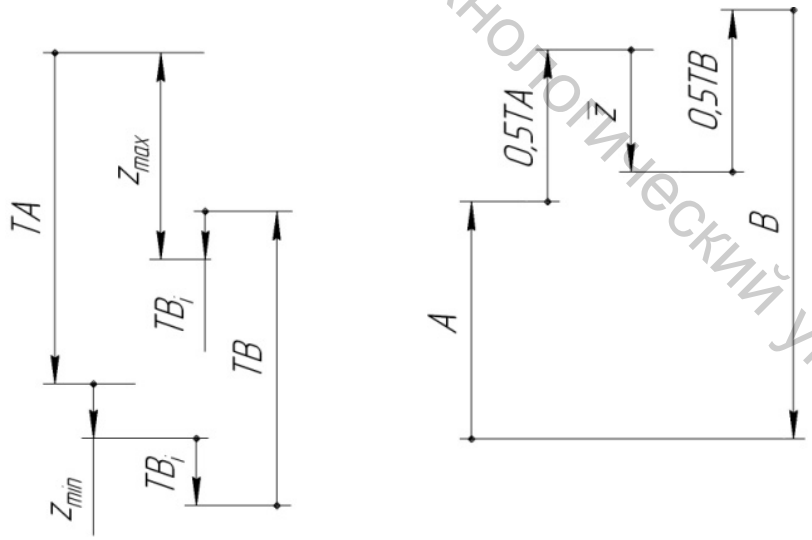


Рисунок 3.54 – Размерные цепи для решения задачи сортировки

Более наглядное и рациональное решение данной задачи обеспечивает графический метод, суть которого состоит в следующем. Проводим горизонтальную ось размеров вала и вертикальную ось размеров отверстия (рис. 3.55).

Витебский государственный технологический университет

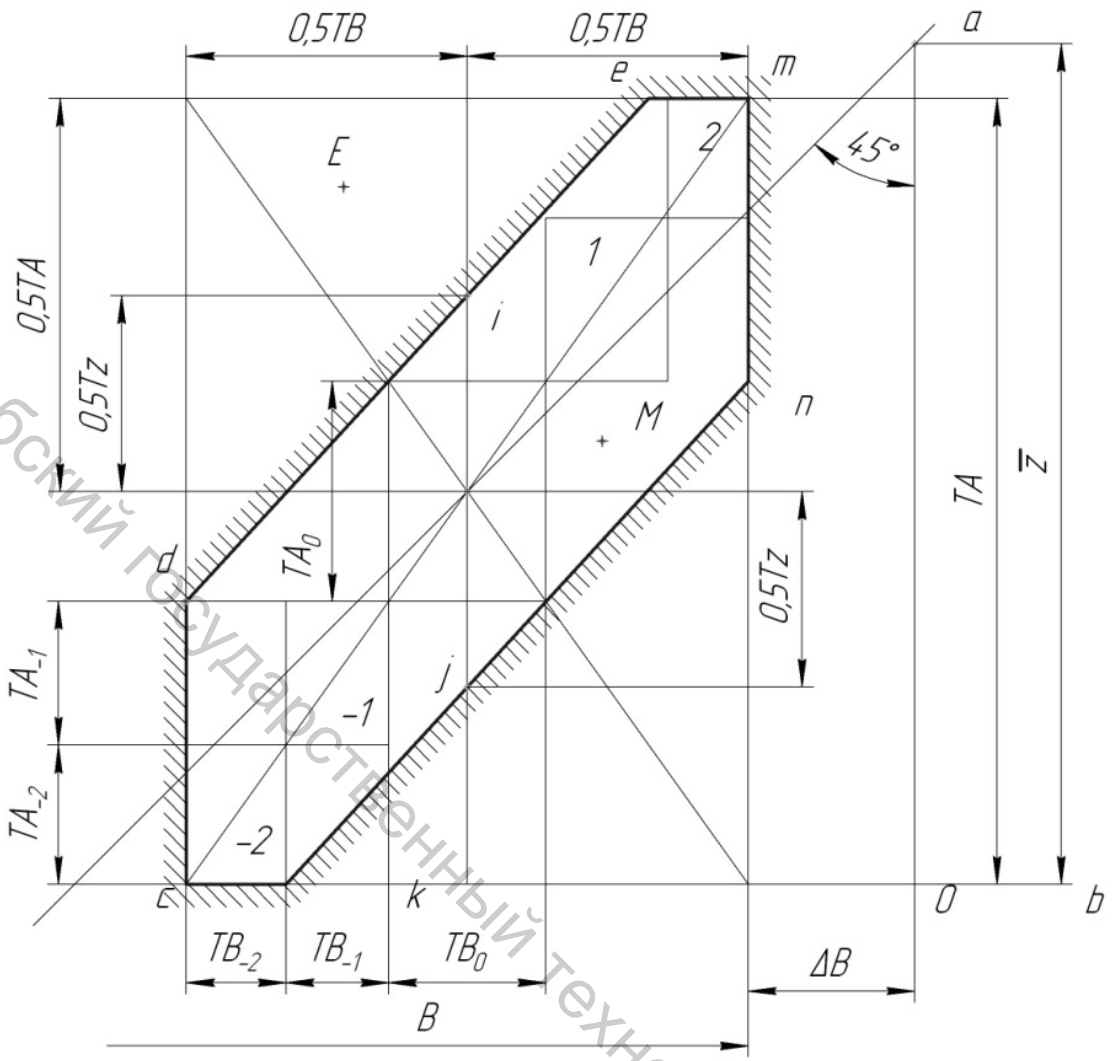


Рисунок 3.55 – Графическое решение задачи определения групповых допусков

Точка *O* в этой системе координат соответствует номинальному размеру соединения. На оси *a* откладываем в выбранном масштабе *TA,* делим это расстояние пополам и проводим через полученные точки горизонтальные линии. На этой же оси откладываем значение $\overline{z}$ и через полученную точку проводим прямую под углом 45° . Полученная на пересечении данной прямой со средней линией допуска *TA* точка *h* будет центром прямоугольника допусков, для построения которого проводим через точку *h* вертикальную линию и откладываем от нее вправо и влево по *0,5TB.* От точки *h* вверх и вниз откладываем по $0{,}5T_z$ и через полученные точки *i* и *j* проводим под углом 45° прямые. В результате получается многоугольник *cdemnk,* выделенный штриховкой. Любая точка в системе координат *aOb* соответствует паре значений размеров *B* и *A.* Если точка попала внутрь многоугольника *cdemnk* (например, *M*), то из данной пары деталей можно получить соединение с заданными характе-

Витебский государственный технологический университет

ристиками. Если точка *E* находится вне указанного многоугольника, то данная пара не позволяет получить заданное соединение.

Следовательно, внутри многоугольника *cdemnk* можно расположить связанные прямоугольники групповых допусков, подобные основному прямоугольнику допусков. Для этого в нем проводим две диагонали. Начинать построение можно от центра или от верхней (нижней) части *em (kc)* многоугольника *cdemnk.* В первом случае строим на диагоналях прямоугольник, который касается границ допустимой области, и получаем значения TA_0 и TB_0. Затем продолжаем вертикальные стороны полученного прямоугольника до встречи с границами допустимой области. Из точек встречи проводим горизонтальные линии до пересечения с диагональю *cm* и получаем таким образом значения групповых допусков $TB_{-1} = TB_1$ и $TA_{-1} = TA_1$. Аналогично проводим построение остальных прямоугольников групповых допусков.

Если начать построение прямоугольников групповых допусков от центра *h,* то возможны ситуации, показанные на рисунке 3.56 а, т.е. групповые допуски TB_2 и TA_2 получаются излишне жесткими. В таких случаях лучше начинать построение от верхней и нижней частей многоугольника *cdemnk* (рис. 3.56 б). При этом не обязательно, чтобы прямоугольники групповых допусков касались границ допустимой области. Преимущество графического метода определения групповых допусков состоит в том, что он позволяет в определенных случаях уменьшить необходимое число групп размеров. Так, например, изображенный на рисунке 3.56 случай соответствует следующим исходным данным: TA = 0,08 мм, TB = 0,06 мм, T_z = 0,04 мм. Тогда N = 6, а графический метод показал, что достаточно пяти групп.

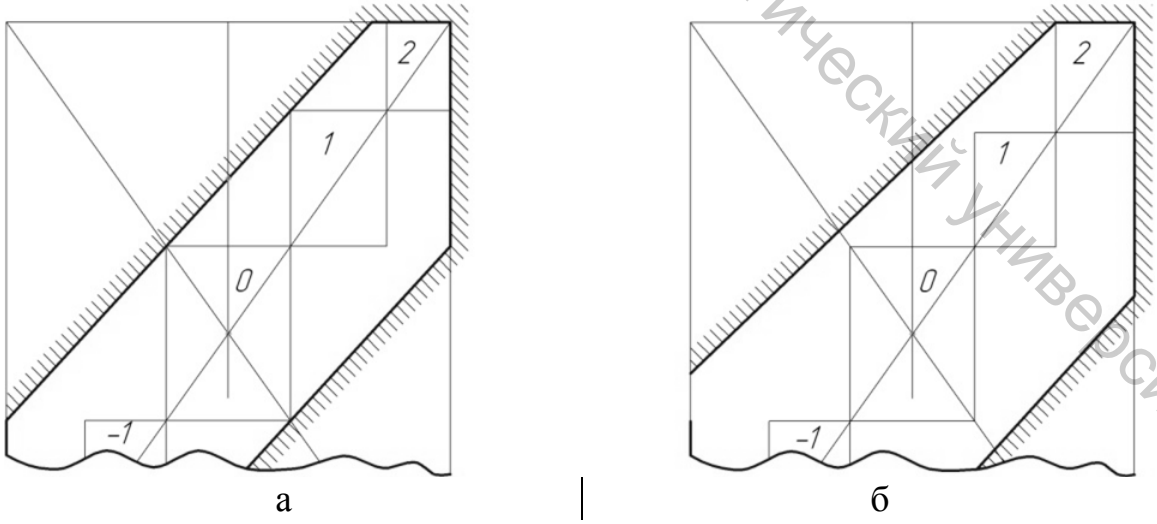


Рисунок 3.56 – Варианты построения прямоугольников групповых допусков

Витебский государственный технологический университет

Если число звеньев размерной цепи больше трех, то задача сортировки и комплектования усложняется и не имеет единственного рационального решения.

Метод подбора заключается в том, что детали, подаваемые на сборку партиями, изготовлены с экономически и технически приемлемой точностью, при которой

$$TA_{\Delta} > \sum_{j=1}^{n-1} TA_j.$$

В таком случае сборщик, согласно измеренным значениям размеров, подбирает детали так, чтобы

$$TA_{\Delta} > \sum_{j=1}^{n-1} TA_j \Delta_j,$$

где Δ_j – реальное отклонение размера j-й детали. Однако в таком случае могут остаться детали, из которых невозможно будет подобрать комплект.

Для повышения эффективности данного метода выделяется специально предусмотренная конструктором компенсационная деталь размером $A_{\text{комп}}$, необходимый разброс которого $\Delta A_{комп}$ можно найти на основании анализа соответствующей цепи:

$$\Delta A_{комп} = TA_{\Delta} + \sum_{j=1}^{n-2} TA_j.$$

Компенсационная деталь обычно проще всех остальных, и ее легче выполнить с достаточно высокой точностью. Сборщик сначала производит предварительную сборку со взятой наугад или эталонной компенсационной деталью, измеряет фактический размер замыкающего звена A_{Δ}. По результатам замера подбирается компенсационная деталь с нужным размером $A_{комп}$, который обеспечивает требования к точности замыкающего звена.

Метод пригонки применяется в условиях серийного и мелкосерийного производства при высоких требованиях к точности замыкающего звена. В данном случае компенсационная деталь после предварительной сборки и измерения фактического размера замыкающего звена обрабатывается на станке или опиливается так, чтобы получить задан-

Витебский государственный технологический университет

ную точность замыкающего звена. Технологический размер компенсационной детали $A_{комп.т}$ определяется из выражения

$$A_{комп.т} = A_{комп.\max} + TA_{комп}.$$

Максимальный припуск, который может быть удален с компенсационной детали

$$П_{\max} = \Delta A_{комп} + TA_{комп}.$$

Конструкторским компенсатором называется одна из штатных деталей сборочной единицы, допускающая изменение (регулирование) ее составляющего или структурного размера в процессе сборки либо в процессе эксплуатации машины для достижения заданной (обычно высокой) точности замыкающего звена. Рационально встроенный в сборочную единицу конструкторский компенсатор может способствовать повышению надежности машины, так как позволяет поддерживать в процессе эксплуатации необходимую точность замыкающего звена.

Применение конструкторской компенсации наиболее целесообразно для уменьшения последствий влияния таких погрешностей формы и положения, как некруглость, неплоскостность, непараллельность и неперпендикулярность.

3.5 Синтез маршрута обработки заготовки

3.5.1 Структура исходных данных

На стадии проектирования технологии задача обеспечения взаимного расположения комплекса обрабатываемых и необрабатываемых поверхностей, равномерности снятия припуска с поверхностей, требуемых показателей точности чертёжных размеров, а также требуемых допусков взаимного расположения (перпендикулярность, параллельность, угол и т.д.) поверхностей решается на этапе синтеза маршрута обработки заготовки. Назначение маршрута обработки заготовки включает в себя решение задач выбора оборудования, определения порядка обработки и смены баз [2–5].

Каждый предыдущий этап типовой схемы обработки детали является подготовительным для последующего. Поэтому *для каждого этапа* необходимо определить базы для обработки на первой и на последующих операциях, порядок обработки и смены баз.

Витебский государственный технологический университет

Для решения задачи рассматривается модель состояния заготовки на этапах типовой схемы обработки (табл. 3.2). Модель формируется с использованием информации о функциональных модулях (ФМ) и технологических маршрутах, а также обозначений линейных и угловых связей главных поверхностей ФМ (графов линейных и угловых связей).

Таблица 3.2 – Типовая схема обработки корпусных деталей

№	Наименование этапа	Содержание этапа	IT
0	Заготовительный	Изготовление заготовки и ее подготовка к обработке	18-20
1	Предварительный	Удаление напусков и части припусков с основных и вспомогательных баз, крупных плоскостей и отверстий	14-15
2	Термический	Старение искусственное	15-16
3	Малярный 1	Грунтование исходных поверхностей	
4	Чистовой 1	Обработка основных и вспомогательных баз, плоскостей, фасок и канавок для выхода инструмента	12-14
5	Чистовой 2	Обработка крепежных отверстий, мелких плоских поверхностей, пазов	9-12
6	Отделочный	Окончательная обработка конструкторских баз	5-8
7	Малярный 2	Нанесение лакокрасочных покрытий	

Исходными данными алгоритма определения комплектов баз ориентации внутри этапов типовой схемы обработки деталей являются $ФМ_j; TM_j; R_{(X,Y,Z)}; U$.

Под множеством $ФМ_i$ подразумевается комплексный ФМ, под которым понимается структурно максимально сложный модуль, имеющий наивысшие показатели качества

$$ФМ_j = (n_1, n_2, ...\overline{n}_m, ...n_{i-1}, ...n_i),$$

где $n_i \in ФМ$-iр, $\overline{n}_i$ – главные поверхности модуля.

Определение состояния ФМ $ФМ_j^З$, $ФМ_j^П$, $ФМ_j^Ч$, $ФМ_j^О$ и маршрута его обработки 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

Витебский государственный технологический университет

маршрута ФМ низкого ранга на основе моделирования состояния показателей его качества.

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

$$ФМ_j \rightarrow ТМ_j = \{n_i^{пчо}, пер_y i, Ри, Уп, Э\},$$

где $n_i^{пчо}$ – совокупность обрабатываемых ФМ нулевого ранга; $пер_y i$ – переходы обработки и их точность; *Ри* – виды режущего инструмента и их размерные характеристики; *Уп* – фрагменты управляющей программы для станков с числовым программным управлением; *Э* – этап типовой схемы обработки, в который распределяется переход.

Для структурирования информации о ФМ по служебному назначению предлагается их характеризовать показателями двух видов: внутренними и внешними. *Внутренние* определяют форму, размеры, взаимное расположение и показатели качества компонентов ФМ на этапе.

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

$$ФМ_j^З = (n_1^З, n_2^З \ldots n_{i-1}^З, n_i^З)$$

$$ПКп_i^З = \{Хр_i^З, Фн_i^З, Гбр_i^З, Кч_i^З, Дп_i^З, Ор_i^З\}$$

$$ПКп_2^З = \{Хр_2^З, Фн_2^З, Гбр_2^З, Кч_2^З, Дп_2^З, Ор_2^З\}$$

$$ПКп_1^З = \{Хр_1^З, Фн_1^З, Гбр_1^З, Кч_1^З, Дп_1^З, Ор_1^З\}$$

$$ФМ_j^П = (n_1^П, n_2^П \ldots n_{i-1}^П, n_i^П)$$

$$ПКп_1^П = \{Хр_1^П, Фн_1^П, Гбр_1^П, Кч_1^П, Дп_1^П, Ор_1^П\}$$

$$ПКп_2^П = \{Хр_2^П, Фн_2^П, Гбр_2^П, Кч_2^П, Дп_2^П, Ор_2^П\}$$

$$ПКп_i^П = \{Хр_i^П, Фн_i^П, Гбр_i^П, Кч_i^П, Дп_i^П, Ор_i^П\}$$

$$ФМ_j^Ч \ldots\ldots\ldots\ldots$$

где *Хр* – характер поверхности (ось – О, плоскость – Р); *Фн* – функциональная принадлежность (функциональная, технологическая поверх-

Витебский государственный технологический университет

ность); *Гбр* – габарит поверхности (длина и ширина для плоской поверхности, диаметр и длина); *Кч* – качество (квалитет IT и шероховатость Ra); *Дп* – доступность для обработки в координатном направлении; *Ор* – ориентация поверхности (координаты единичного вектора).

Оперирование с внешними параметрами в задаче синтеза маршрута обработки и схем базирования предлагается осуществлять с помощью *графов линейных размерных связей R(x,y,z) главных поверхностей ФМ в трех координатных направлениях и графов угловых связей U* обрабатываемых главных поверхностей ФМ по отношению к обрабатываемым поверхностям и угловых расположений обрабатываемых поверхностей по отношению к необрабатываемым на этапе типовой схемы обработки.

Множество линейных размерных связей *R(x,y,z)* представляется в виде неориентированного графа типа дерева

$$R_{(x,y,z)} = (\overline{N}, V),$$

где $\overline{N} = \{\overline{n}_1, \overline{n}_2, \ldots \overline{n}_m\}$, $\left|\overline{N}\right| = m$ – множество вершин (главных поверхностей модуля); $V = \{v_1, v_2, \ldots v_k\}$, $|V| = k$ – множество линейных размеров, соединяющих любые пары вершин, $(\overline{n}_i, \overline{n}_j) \in \overline{N}$, то есть множество ребер.

В рассмотренном графе множество ребер является неориентированными линиями, для которых не существен порядок соединения вершин: $v_i = (\overline{n}_i, \overline{n}_j)$ или $v_i = (\overline{n}_j, \overline{n}_i)$.

Задачи внутримашинного представления информации предполагают использование матричного представления графов. Графы $R_{(x,y,z)}$ представляются с помощью матрицы смежности $R^{см}_{(x,y,z)} = \left\| v_{i,j} \right\|_{m \times m}$, элементы которой образуются по правилу:

$$v_{i,j} = \begin{cases} A(T), \text{если вершина } \overline{n}_i \text{ соединена с } \overline{n}_j \text{ ребром;} \\ 0 \text{ в противном случае;} \end{cases}$$

где A(*T*) – соответсвующий линейный размер и численное значение допуска на него; может в свою очередь иметь метку 1 или 2.

Таким образом, в общем виде матрица смежности поверхностей имеет вид

Витебский государственный технологический университет

$$R^{см}_{(x,y,z)} = \begin{array}{c|ccccc|} & \overline{n}_1 & \overline{n}_2 & \dots & \overline{n}_j & \overline{n}_m \\ \overline{n}_1 & 0 & A_{12} & \dots & 0 & A_{1m} \\ \overline{n}_2 & A_{21} & 0 & \dots & 0 & A_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \overline{n}_i & A_{i1} & A_{i2} & \dots & A_{ij} & A_{im} \\ \overline{n}_m & A_{m1} & A_{m2} & \dots & A_{mj} & 0 \end{array}$$

Строки и столбцы матрицы $R^{см}_{(x,y,z)}$ соответствуют вершинам графа. На пересечении *i*-й строки и *j*-го столбца ставится элемент $r_{i,j}$, соответствующий численному значению допуска на размер, соединяющий вершины $\overline{n}_i$ и $\overline{n}_j$. 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, обозначающие необрабатываемые поверхности и если ребро соединяет вершины, обозначающие обрабатываемую и необрабатываемую поверхности.

Эффективная работа САПР ТП *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:

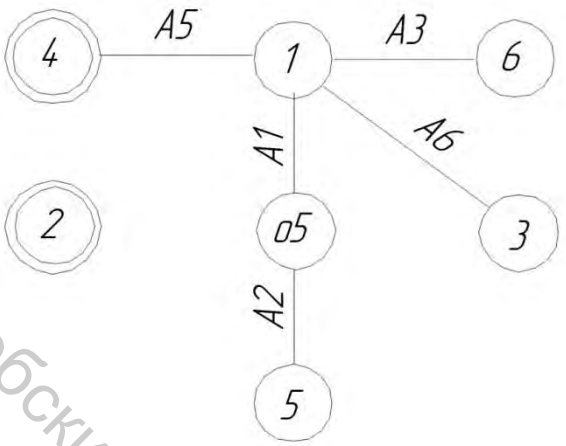
– число вершин на графе должно быть на 1 больше числа ребер, т.е. должно выполняться условие $KI/2 = m-1$, где KI – сумма строк и столбцов, не равных 0; если $KI/2 < m-1$, то на чертеже недостаточно линейных размеров; если $KI/2 > m-1$, то на чертеже $KI/2-m+1$ лишних размеров;

– на графе не должно быть оторванных вершин, т.е. в матрице не должно быть нулевой строки (столбца) (рис. 3.57, строка (столбец) 2);

– 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» (рис. 3.58, строки (столбцы) *1* и *о5*);

– на графе не должно быть замкнутых контуров; для проверки этого условия в строке (столбце) матрицы отыскиваются единственные ненулевые элементы (рис. 3.59 а, б); далее эти строки (столбцы) обнуляются (в графе отсекаются вершины) (см. рис. 3.59 в, г)); в результате получится новая 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 (см. рис. 3.59 д, е).

Витебский государственный технологический университет



а

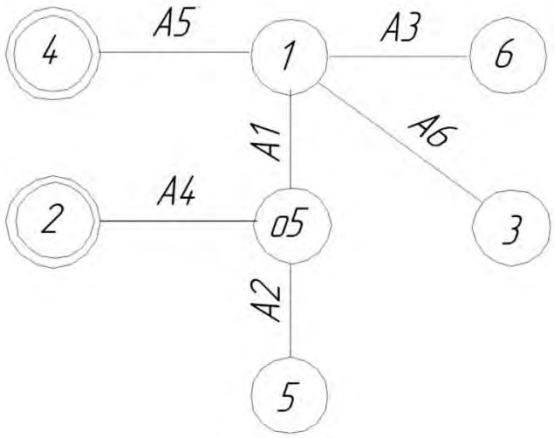
	1	2	3	4	5	o5	6
1	0	0	1	2	0	1	1
2	0	0	0	0	0	0	0
3	1	0	0	0	0	0	0
4	2	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	1	0
o5	1	0	0	0	1	0	0
6	1	0	0	0	0	0	0

б

– вершины, обозначающие обрабатываемые поверхности;

– вершины, обозначающие необрабатываемые поверхности

Рисунок 3.57 – Пример проверки условия на оторванные вершины:
а – граф линейных размеров, б – нулевая строка (столбец) в матрице смежности



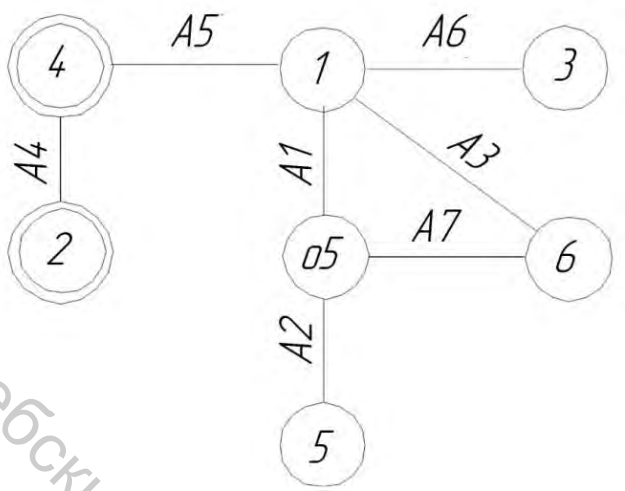
а

	1	2	3	4	5	o5	6
1	0	0	1	2	0	1	1
2	0	0	0	0	0	2	0
3	1	0	0	0	0	0	0
4	2	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	1	0
o5	1	2	0	0	1	0	0
6	1	0	0	0	0	0	0

б

Рисунок 3.58 – Пример проверки условия на отсутствие связей между комплексом обрабатываемых и необрабатываемых поверхностей:
а – граф линейных размеров, б – строки (столбцы) в матрице смежности с меткой 2

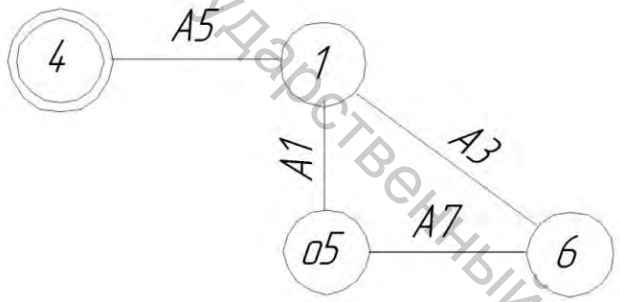
Витебский государственный технологический университет



а

	1	2	3	4	5	o5	6
1	0	0	1	2	0	1	1
2	0	0	0	2	0	0	0
3	1	0	0	0	0	0	0
4	2	2	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	1	0
o5	1	0	0	0	1	0	1
6	1	0	0	0	0	1	0

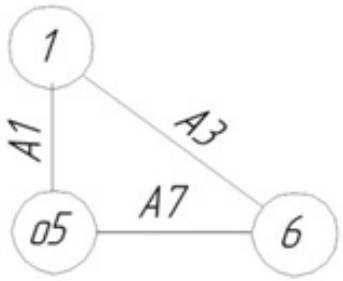
б



в

	1	2	3	4	5	o5	6
1	0	0	0	2	0	1	1
2	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0
4	2	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0
o5	1	0	0	0	0	0	1
6	1	0	0	0	0	1	0

г



д

	1	2	3	4	5	o5	6
1	0	0	0	0	0	1	1
2	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0
o5	1	0	0	0	0	0	1
6	1	0	0	0	0	1	0

е

Рисунок 3.59 – Пример выявления замкнутого контура:
а – граф линейных размеров с замкнутым контуром, б – строки (столбцы) в матрице смежности с единственным ненулевым элементом, в – граф с отсеченными вершинами, г – матрица смежности с обнуленными единственными ненулевыми элементами, д – замкнутый контур на графе, е – матрица смежности после обнулений, соответствующая замкнутому контуру на графе

Витебский государственный технологический университет

Граф угловых связей отражает отношения перпендикулярностей и углов между главными поверхностями ФМ с учетом особенностей их технологического обеспечения. Стрелками на графе указывается отношение перпендикулярности или угла рассматриваемого ФМ к поверхности ФМ, являющейся базой ориентации. Направление стрелки указывает базовый элемент, по отношению к которому ориентируется поверхность.

Множество угловых связей можно представить в виде ориентированного графа

$$U = (\overline{N}, Y),$$

где $\overline{N} = \{\overline{n}_1, \overline{n}_2, \ldots \overline{n}_m\}$, $\left|\overline{N}\right| = m$ – множество вершин (главных поверхностей модуля); $Y = \{y_1, y_2, \ldots y_l\}$, $|Y| = l$ – множество угловых размеров, соединяющих любые пары вершин, $(\overline{n}_i, \overline{n}_j) \in \overline{N}$, то есть множество дуг.

В рассмотренном графе множество дуг является ориентированными линиями, для которых существенен порядок соединения вершин. Причем каждая дуга $y_i \in Y$ определяется упорядоченной парой (кортежем длины два) вершин

$$y_i = < \overline{n}_i, \overline{n}_j > .$$

Следует отметить, что $y_i = < \overline{n}_i, \overline{n}_j >$ и $y_i = < \overline{n}_j, \overline{n}_i >$ это различные дуги в графе *Y*.

Граф *U* предлагается представлять в виде матрицы инцидентности. Под матрицей инцидентности понимается прямоугольная таблица вида $U^{ин} = \left\| y_{i,j} \right\|_{m \times l}$, элементы которой образуются по правилу

$$y_{i,j} = \begin{cases} T, \text{если ребро } v_j \text{ выходит из вершины } \overline{n}_i; \\ -T, \text{если ребро } v_j \text{ входит в вершину } \overline{n}_i; \\ 0, \text{если } v_j \text{ и } \overline{n}_i \text{ не инцидентны;} \end{cases}$$

где *T* – соответствующий допуск углового расположения.

Графы угловых расположений формируются согласно принципам однозначности и корректности задания ориентации элементов кон-

Витебский государственный технологический университет

струкции относительно того или иного комплекта баз ориентации (см. раздел 3.2.3), 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, имеющую меньшую шероховатость. Если деталь имеет элементы, для которых указаны допуски перпендикулярности, то неуказанные допуски следует относить к тем же базам, что и указанные. Числовые значения неуказанных допусков перпендикулярности также определяются в зависимости от номинального размера и определяющего допуска размера;

– обрабатываемая главная плоскость ФМ (1) может ориентироваться в координатных направлениях относительно следующих компонентов комплекта баз ориентации:

а) двух явных плоскостей (рис. 3.60 а; плоскости *2* и *3*);

б) явной плоскости и плоскости симметрии (рис. 3.60 б; плоскости *2* и *3*);

в) оси и скрытой плоскости, проходящей через ось (в частности плоскости симметрии) (рис. 3.60 в; оси *o3* и плоскости *n*);

г) плоскости, проходящей через оси двух отверстий и другой плоскости;

– главная ось ФМ может ориентироваться в координатных направлениях относительно следующих компонентов комплекта баз:

а) явной плоскости (рис. 3.61 а; плоскость *1*);

б) оси и плоскости связанной с осью (в частности к плоскости симметрии) (рис. 3.61 б; ось *o1* и плоскость *n*);

в) плоскости, проходящей через оси двух отверстий (в частности плоскости симметрии) (рис. 3.61 в; плоскость *n* и оси *o1* и *o2*);

г) плоскости симметрии плоских элементов.

В связи с тем, что необходимое относительное расположение поверхностей может быть обеспечено прямым и косвенным путями граф угловых расположений может отражать угловую ориентацию не только отдельной поверхности ФМ, но и всего ФМ, у которого обычно известны внутренние локальные характеристики.

Прямое обеспечение заданных требований к расположению поверхностей может быть реализовано обработкой:

– от единой базы всех поверхностей, связанных указанными требованиями за один установ (рис. 3.62 а; поверхности 1), что характерно для обработки функционального модуля (ФМ) целиком (т.е. обеспечение внутренних параметров ФМ);

Витебский государственный технологический университет

– от разных баз при использовании одной из связанных требованиями точности относительного расположения поверхностей в качестве базы (рис. 3.62 б);

– от единой базы за несколько установов (рис. 3.62 в).

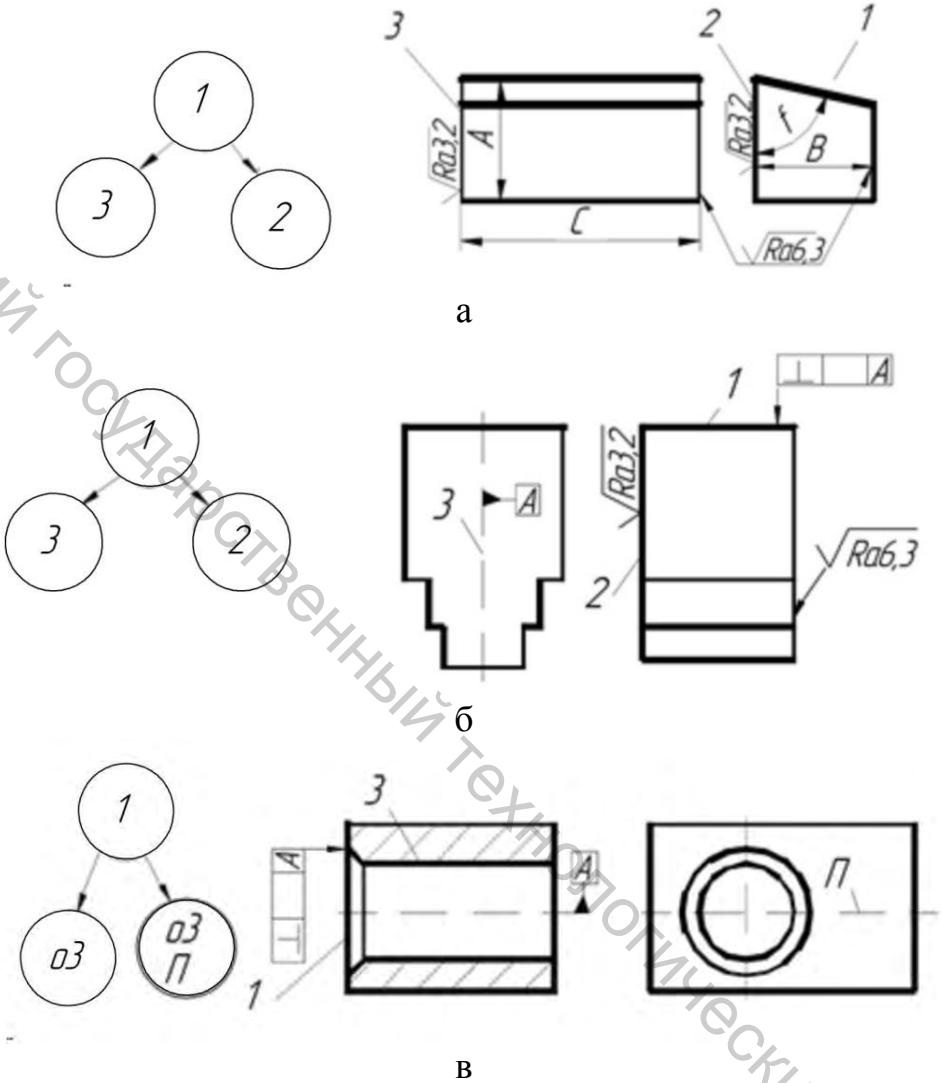


Рисунок 3.60 – Схема к определению перпендикулярности плоскости к компонентам комплекта баз ориентации:
а – ориентация главной плоскости ФМ относительно двух явных плоскостей, б – ориентация главной плоскости ФМ относительно явной плоскости и плоскости симметрии, в – ориентация главной плоскости ФМ относительно оси и скрытой плоскости, проходящей через ось

Для случая, показанного на рисунке 3.62 а, на графе угловых расположений отражается ориентация торцевой главной поверхности модуля относительно его главной оси. Чтобы предусмотреть вариант, когда нет оборудования для одновременной обработки торца и отверстия, а заданные требования перпендикулярности можно обеспечить, используя в качестве базы ось либо торец, то на графе отражается ориентация

Витебский государственный технологический университет

торцевой поверхности относительно другой «внешней» главной поверхности ФМ.

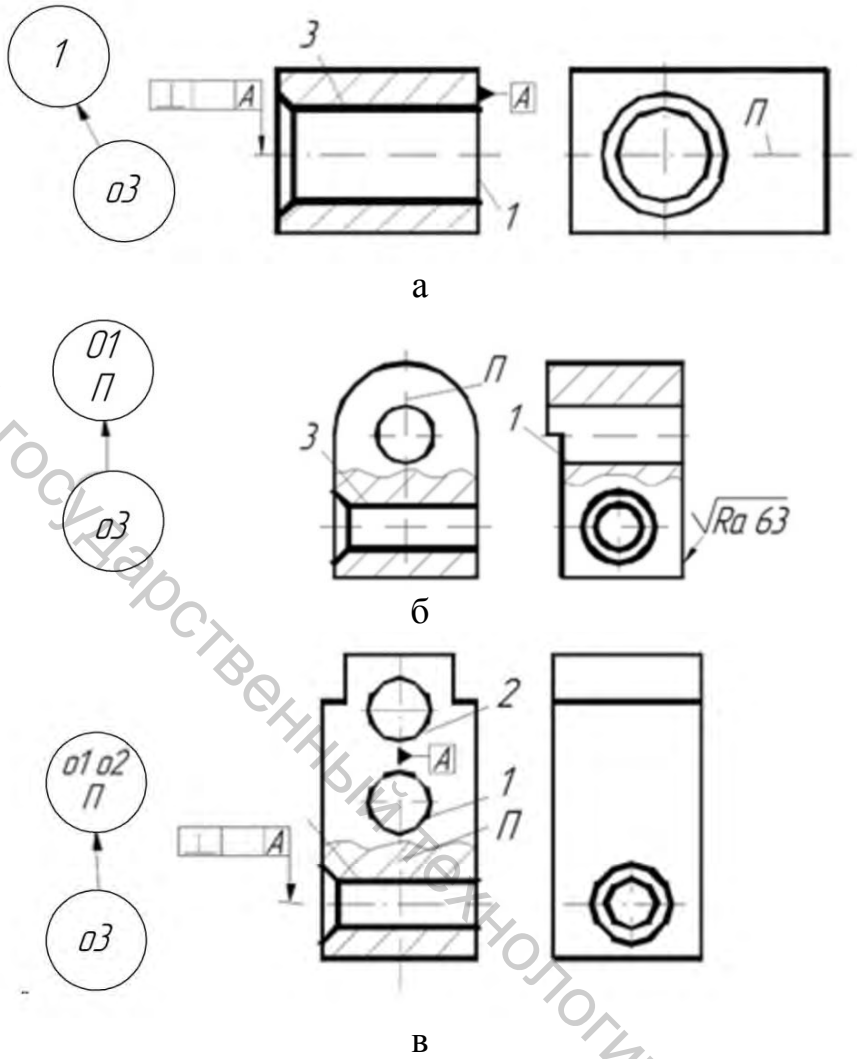
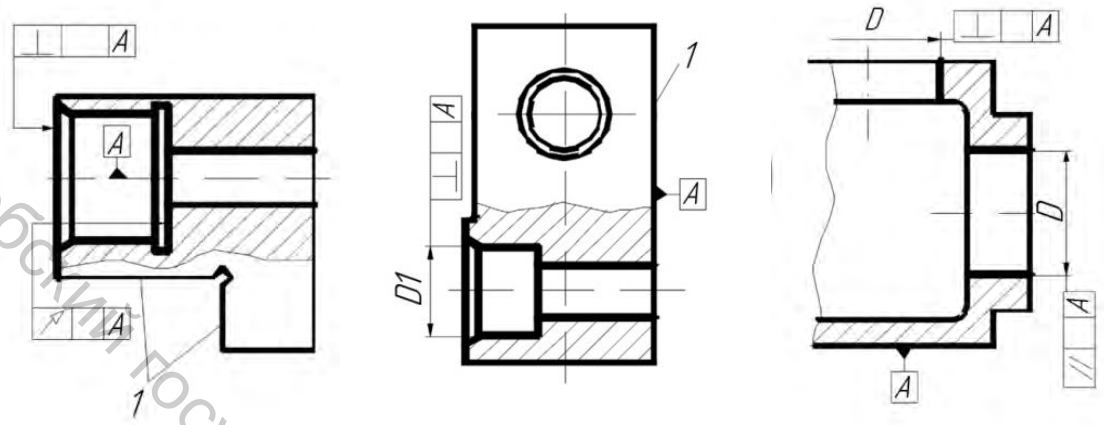


Рисунок 3.61 – Схема к определению перпендикулярности главной оси ФМ к компонентам комплекта баз ориентации:
а – ориентация главной оси ФМ относительно явной плоскости,
б – ориентация главной оси ФМ относительно оси и плоскости, связанной с осью, в – ориентация главной оси ФМ относительно плоскости, проходящей через оси двух отверстий

В случае, показанном на рисунок 3.62 б, при обработке выделенных поверхностей ФМ в качестве базы применяется предварительно обработанная поверхность *1*. В случае, показанном на рисунке 3.62 в, невозможность обработки без специального приспособления и поворотного стола на горизонтально-расточном станке за один установ нескольких отверстий, параллельных базе *А*, и одного перпендикулярного к ней, вынуждает вести обработку последнего либо на другом станке, либо с установкой в другом приспособлении. Однако принимать решение о возможности обработки тех или иных функциональных модулей или

Витебский государственный технологический университет

поверхностей на том или ином оборудовании необходимо на стадии проектирования операции.



а б в

Рисунок 3.62 – Схема иллюстрации методов прямого обеспечения требований к расположению поверхностей:
а – единая база для всех поверхностей, связанных указанными требованиями за один установ, б – использование одной из связанных требованиями точности относительного расположения поверхностей в качестве базы; в – за несколько установов от единой базы

Для формального автоматического построения графов угловой ориентации главных поверхностей друг относительно друга 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 начале системы координат. Под единичным вектором прямой будем понимать любой вектор единичной длины, параллельный рассматриваемой оси и имеющий начало в начале 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 (см. аналитическая геометрия), то можно определять показатели взаимного углового расположения любых пар поверхностей внутри функционального модуля и детали в целом. Определив базовые поверхности для ориентации и численные значения допусков (по протяженности поверхности в координатном направлении и ее шероховатости см. выше), можно в автоматическом режиме сформировать графы угловых расположений (рис. 3.63).

Витебский государственный технологический университет

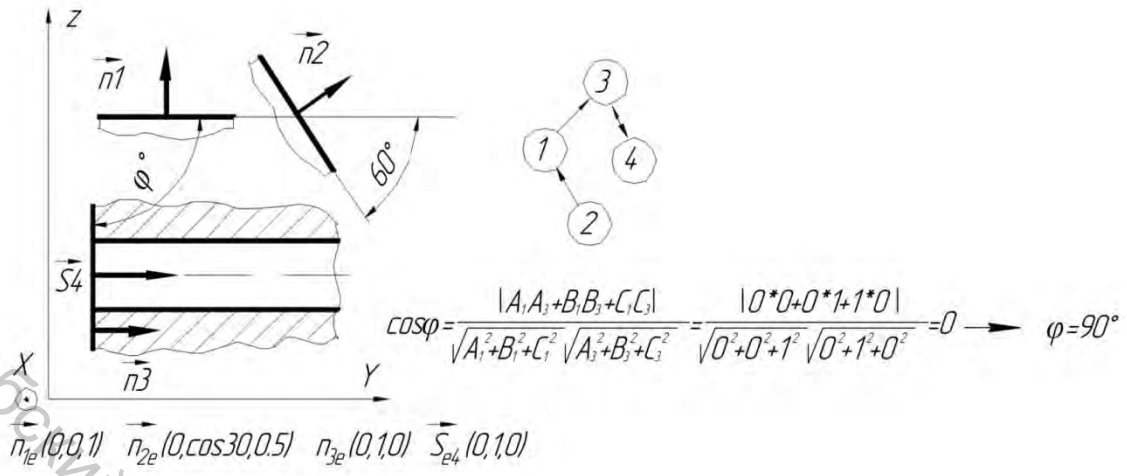


Рисунок 3.63 – Схема иллюстрации формального определения ориентации поверхностей

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.

3.5.2 Определение порядка обработки и смены баз

Определение порядка обработки и смены баз можно производить *двумя методами*: с помощью «отсеченных» графов на этапах типовой схемы; с помощью определения всех возможных комплектов баз ориентации поверхностей и последующего их анализа. Второй метод является более формализованным. Первый удобен для «ручного» применения.

Шаг 1. Используя *ФМj* и *ТМj*, формируются модели модулей $ФМ_j^П; ФМ_j^Ч; ФМ_j^О$ и детали $КД_j^П; КД_j^Ч; КД_j^О$ после выполнения этапа типовой схемы обработки.

На рисунке 3.64 для примера показан эскиз детали, а на рисунках 3.65–3.67 приведены графические модели состояния заготовки для предварительного, чистового и отделочного этапов со всеми необходимыми обозначениями.

Витебский государственный технологический университет

Витебский государственный технологический университет

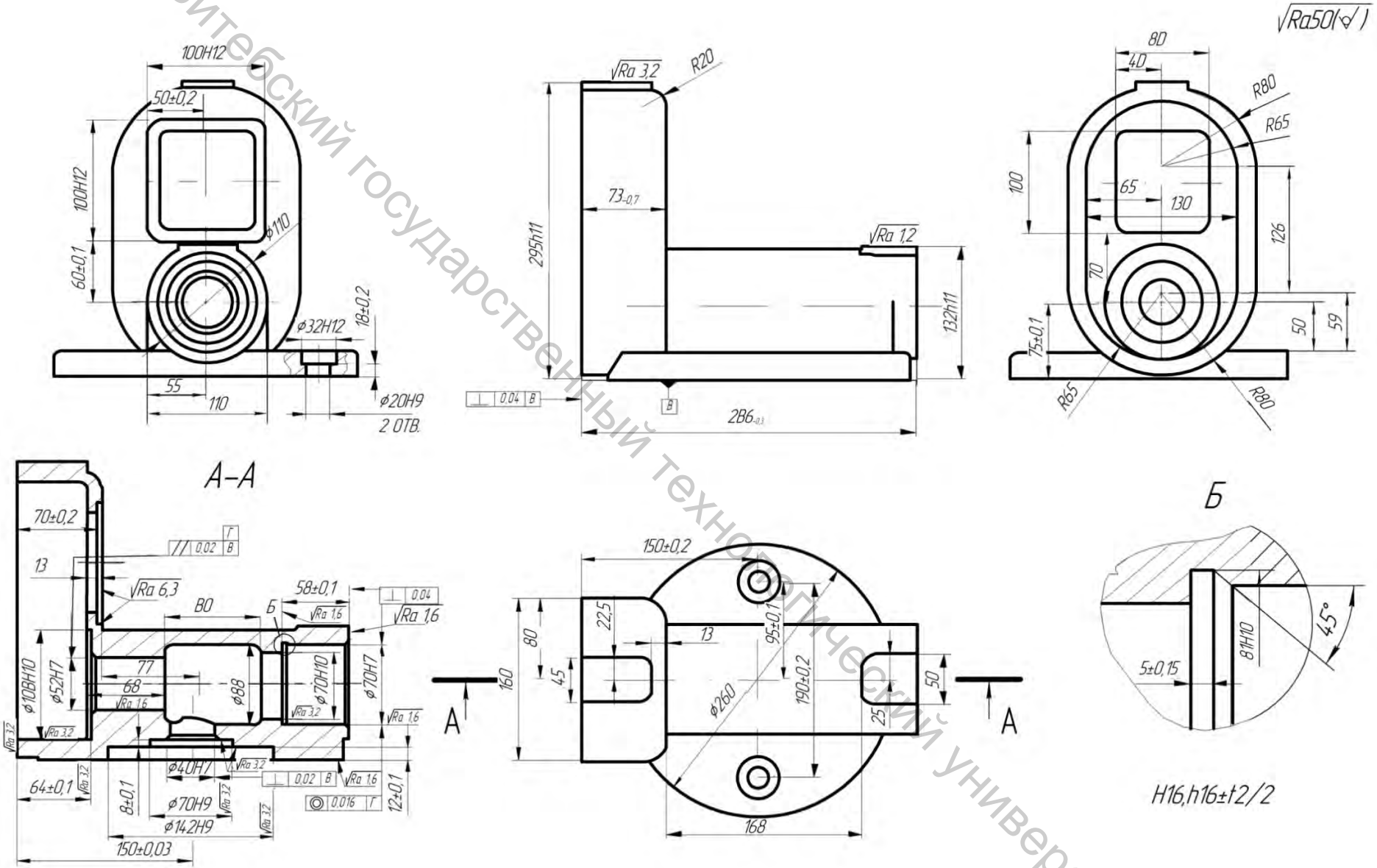


Рисунок 3.64 – Эскиз детали

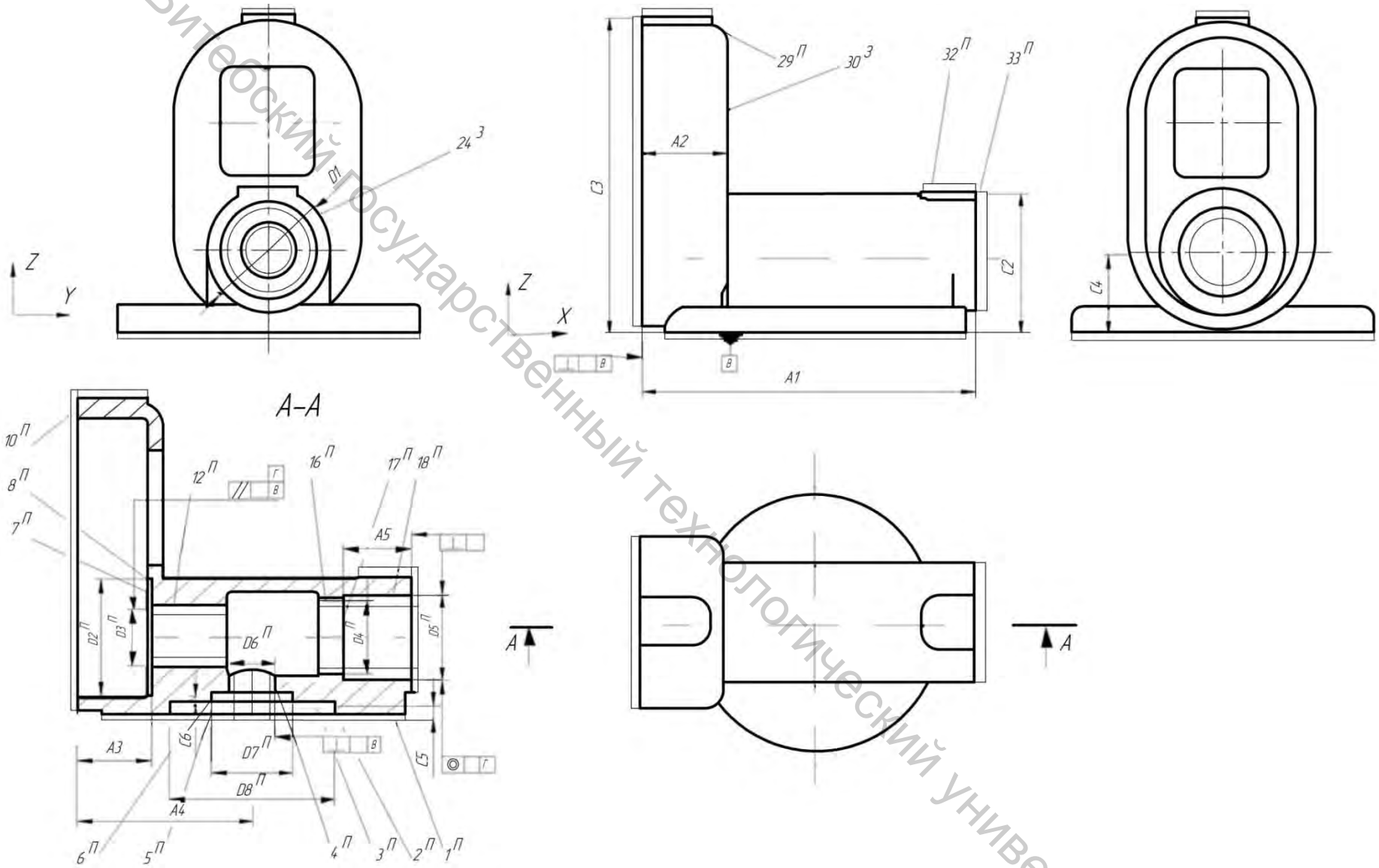


Рисунок 3.65 – Модель состояния объекта производства после предварительного этапа

Витебский государственный технологический университет

145

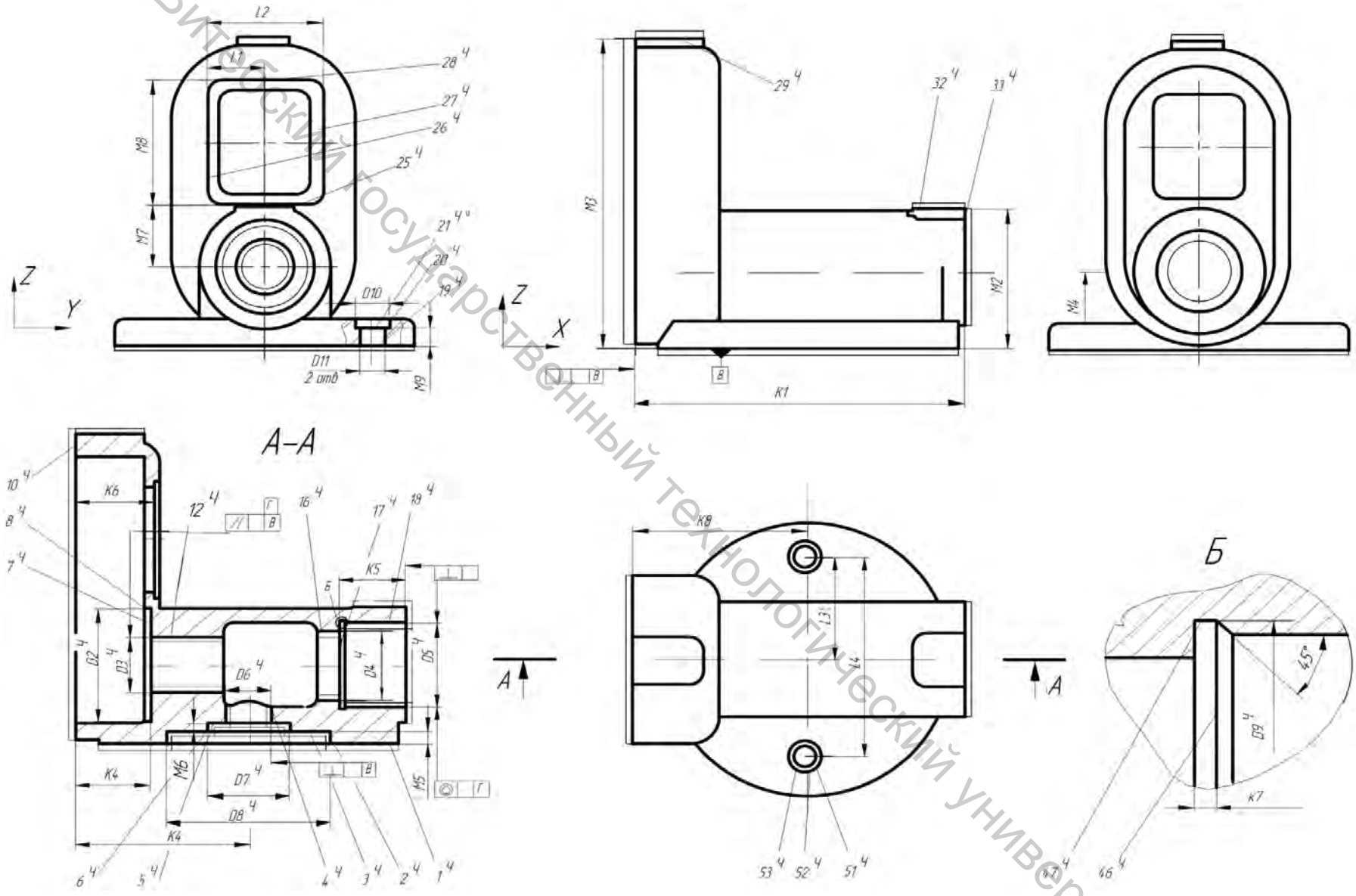


Рисунок 3.66 – Модель состояния объекта производства после чистового этапа

Витебский государственный технологический университет

146

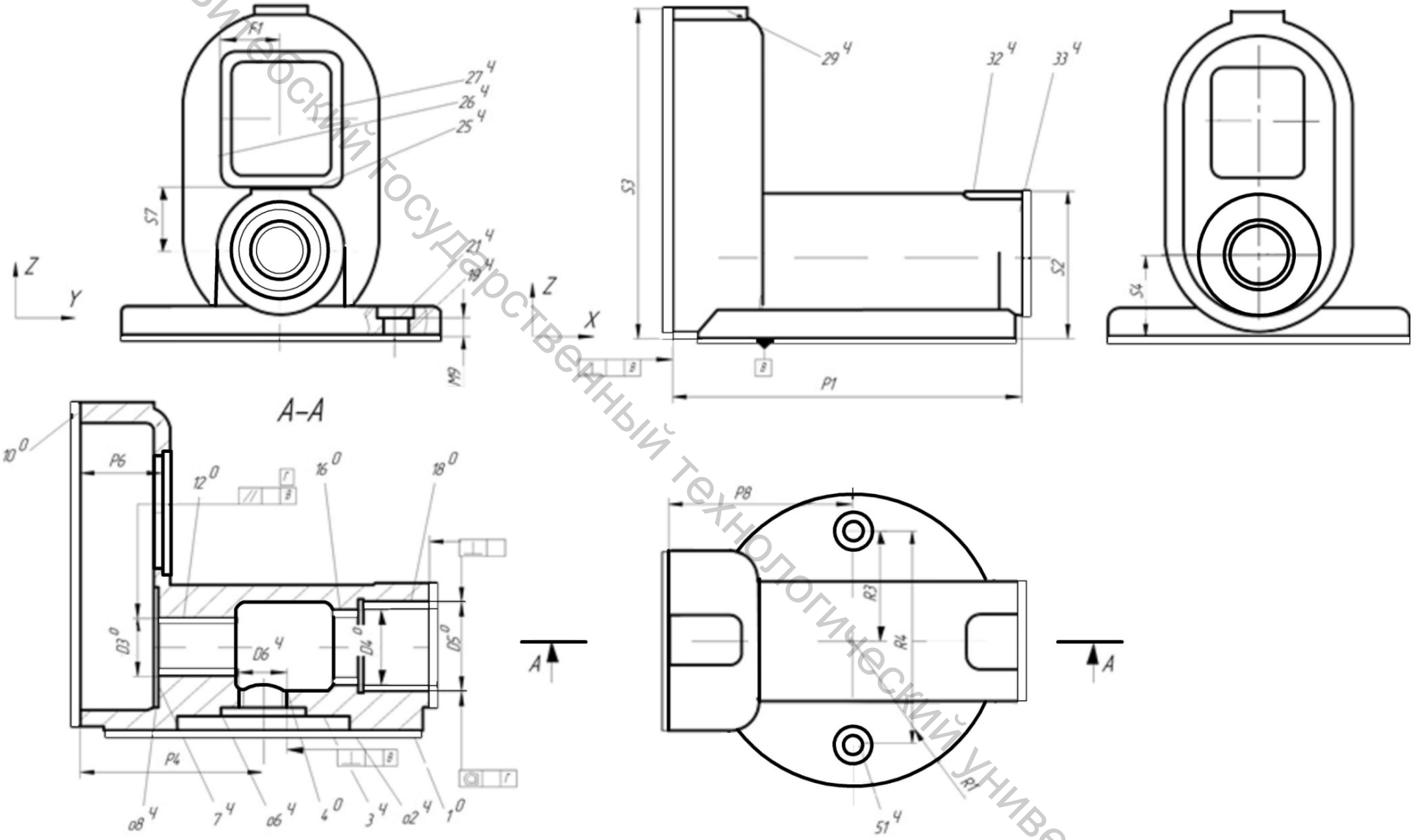


Рисунок 3.67 – Модель состояния объекта производства после отделочного этапа

147

Витебский государственный технологический университет

Шаг 2. Задаются внутренние показатели ФМ $ПКn_i^П; ПКn_i^Ч; ПКn_i^О$.

Шаг 3. Используя $ПКn_i$, R(x,y,z) и U чертежа детали, формируются модели линейных связей (для первого метода) или линейных и угловых связей (для второго метода) на этапах.

Этап типовой схемы

Предварительный | Чистовой | Отделочный

$$R^{П}{}_{(x,y,z)} = (\overline{N}^{ПЗ}, V^{ПЗ}); R^{Ч}{}_{(x,y,z)} = (\overline{N}^{ЧП}, V^{ЧП});\ R^{О}{}_{(x,y,z)} = (\overline{N}^{ОЧ}, V^{ОЧ});$$

$$U^{П}_{n_i^{обр-нобр}} = (\overline{N}^{ПЗ}, Y^{ПЗ});\ U^{Ч}_{n_i^{обр-нобр}} = (\overline{N}^{ЧП}, Y^{ЧП}); U^{О}_{n_i^{обр-нобр}} = (\overline{N}^{ОЧ}, Y^{ОЧ})$$

$$U^{П}_{n_i^{обр-обр}} = (\overline{N}^{ПЗ}, Y^{ПЗ});\ U^{Ч}_{n_i^{обр-обр}} = (\overline{N}^{ЧП}, Y^{ЧП});\ U^{О}_{n_i^{обр-обр}} = (\overline{N}^{ОЧ}, Y^{ОЧ})$$

где *З,П,Ч,О* – индексы, обозначающие заготовительный, предварительный, чистовой и отделочный этапы; *обр-нобр* – индекс, обозначающий отношение между обрабатываемыми и необрабатываемыми поверхностями; *обр-обр* – индекс, обозначающий отношение между обрабатываемыми поверхностями.

Для уменьшения наследования погрешности обработки и сокращения числа звеньев технологических размерных цепей графы на этапах строятся по обозначениям размерных связей и допусков взаимного 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. $\overline{N}^{ПЗ}, \overline{N}^{ЧП}, \overline{N}^{ОЧ}$ – это *шесть* различных поверхностей (по две на каждом этапе). Под необрабатываемой поверхностью понимается поверхность, формообразование которой завершилось на предыдущем этапе изготовления.

Графы размерных связей для предварительного этапа показаны на рисунке 3.68, а для чистового и отделочного – на рисунках 3.72 и 3.73. На графах двойной окружностью обозначаются поверхности, формообразование которых завершилось на предыдущем этапе, одной – поверхности, получаемые на рассматриваемой операции и операции ее обработки на предыдущем этапе. Причем на графах для предварительного этапа достаточно отразить лишь одну поверхность, формообразование которой завершилось на заготовительном этапе и имеющую единствен-

Витебский государственный технологический университет

ную размерную связь с комплексом обрабатываемых на этапе поверхностей. Внутренние и наружные главные поверхности ФМ вращения на графах представлены только своими осями, так как именно они участвуют в образовании комплектов технологических баз.

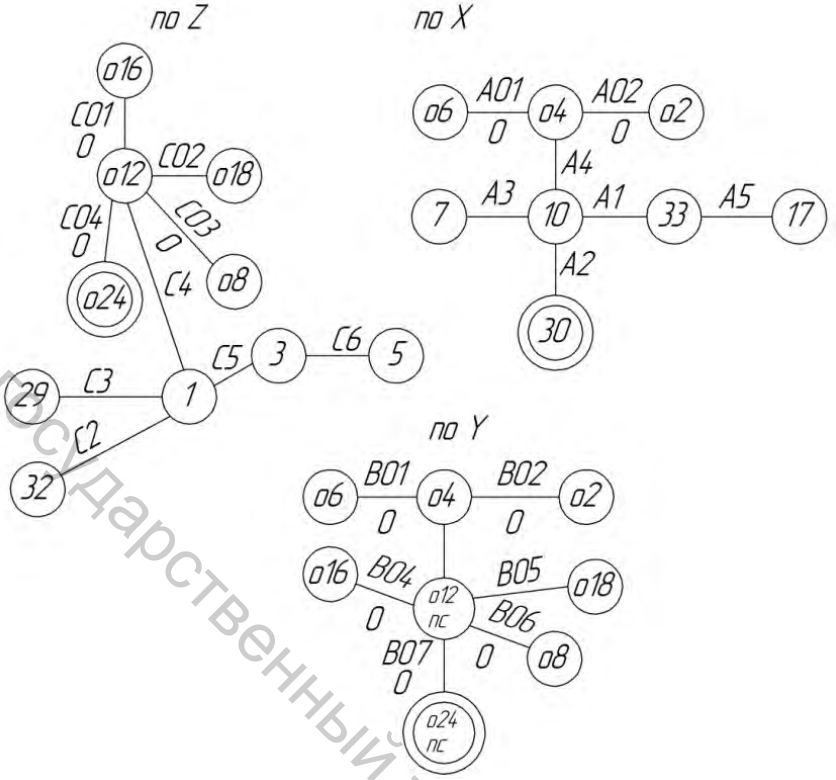


Рисунок 3.68 – Графы размерных связей для предварительного этапа обработки (исходные укороченные)

Графы угловых расположений обрабатываемых поверхностей к необрабатываемым и угловых расположений обрабатываемых поверхностей к обрабатываемым для рассматриваемой детали на предварительном этапе показаны на рисунке 3.69.

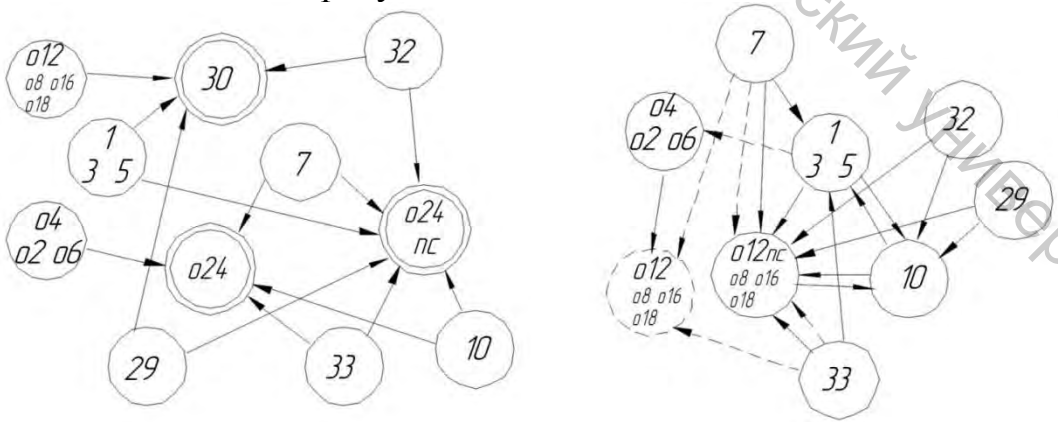


Рисунок 3.69 – Графы угловых расположений обрабатываемых поверхностей к необрабатываемым и угловых расположений обрабатываемых поверхностей к обрабатываемым для рассматриваемой детали на предварительном этапе

Витебский государственный технологический университет

Далее для реализации ***первого метода*** необходимо выполнить следующие шаги.

Шаг 4. Формируется таблица возможности обработки групп поверхностей. Признаками группирования поверхностей являются вектор доступности поверхности для обработки, а также возможность обработки ряда поверхностей с одного установа на одном виде оборудования.

Пусть в исходных данных проекта имеются следующие станки: многооперационные станки с ЧПУ, вертикально-фрезерный, расточной, карусельный, сверлильный. Если в задании имеются многооперационные станки с ЧПУ, оснащенные поворотным столом, тогда в одну группу могут включаться поверхности, расположенные с разных сторон детали. Группы для рассматриваемого этапа приведены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Возможность обработки групп поверхностей на станках

№ пп	Станки	Группы поверхностей			
1	Многоцелевой с ЧПУ	о12,10,7,о8	1,3,5 о2,о4,о6	33,о16,о18,17	32,29
2	Карусельный	1,3,5 о2,о4,о6	33,о16,о18,17		
3	Горизонт.-расточной	1,3,5,о2,о4,о6	33,о16,о18,17	о12,7,о8,10	
4	Вертикально-фрезерный	32	10	1	33
		29			
5	Сверлильный	о12	о4	о16	
6	*Многоцелевой с поворотным столом*	*о12,10,7,о8*	*1,3,5 о2,о4,о6*	*33,о16,о18,17*	*32,29*
		о12,10,7,о8 1,3,5 о2,о4,о6	*о12,10,7,о8 33,о16,о18,17*	*о12,10,7,о8 32,29*	*1,3,5 о2,о4,о6 33,о16,о18,17*
		1,3,5 о2,о4,о6 32,29	*33,о16,о18,17 32,29*		
		1,3,5 о2,о4,о6 33,о16,о18,17 32,29	*о12,10,7,о8 33,о16,о18,17 32,29*	*о12,10,7,о8, 1,3,5 о2,о4,о6 32,29*	*о12,10,7,о8 33,о16,о18,17 1,3,5 о2,о4,о6*

Правильный выбор *комплекта баз на первой операции* позволяет *обеспечить заданное чертежом относительное расположение обрабатываемых и исходных поверхностей этапа, а также обеспечить равномерность снятия припуска на поверхности.* Для решения первой задачи в качестве технологических баз на первой операции назначаются исходные (не обрабатываемые на этом этапе, но обработанные на предыдущем) поверхности. Для первой операции технологического процесса в качестве элементов комплекта технологических баз выбираются элементы заготовки, которые не подвергаются механической обработке. Они на графах размерных связей первого этапа *имеют только одну связь* с обрабатываемыми поверхностями. При решении второй задачи в качестве базы на первой операции выбираются именно те поверхности, на которых следует снять равномерный припуск.

Витебский государственный технологический университет

Графы, представленные на рисунке 3.68, указывают, что в качестве комплекта исходных баз ориентации следует назначить три исходные плоскости: *30*, *о24пс* и *о24* (*о24пс*, *о24* – плоскость симметрии и плоскость, проходящая через поверхности вращения).

При определении возможности обработки поверхностей группы следует использовать понятие *настроечная база*. Настроечная база используется в случаях, когда с одного установа требуется обработать несколько поверхностей, связанных размерами и (или) относительными поворотами. Одна из них связана размером (относительным поворотом) с технологической базой ориентации. Именно эта поверхность будет для другой обрабатываемой поверхности *настроечной* базой.

Таким образом, на первой операции могут обрабатываться группы поверхностей: *о12*, *10*, *7*, *о8* на многоцелевом станке № 1 (поверхность 10 является настроечной базой для поверхности *7*, а *о12* – для *о8*); *10* на фрезерном № 4; *о12* на сверлильном № 5. При выборе варианта следует использовать *принцип концентрации* обработки. В данном случае от комплекта баз *30*, *о24пс* и *о24п* следует обрабатывать поверхности *о12*, *10*, *7*, *о8* на многоцелевом станке № 1 или расточном станке № 3. При прочих равных условиях формируется 2-3 конкурирующих варианта операций.

Шаг 5. Строятся «отсеченные» графы, удалив из начальных исходные поверхности те из обработанных на первой операции, которые имеют связь с обработанными на первой операции и не имеют таковой с еще не обработанными. Исключение делается для соосных поверхностей. Вид графов будет зависеть от того, какая из групп поверхностей обработана на первой операции.

При помощи «отсеченных» графов, используя правила определения комплектов технологических баз для первой операции, назначаются комплекты баз для последующих операций.

Указанные графы показаны на рисунке 3.70. Здесь обработанные на первой операции и оставленные в качестве возможных технологических баз поверхности отражаются «разорванной» окружностью.

На второй операции от комплекта баз *о12пс*, *о12*, *10* могут обрабатываться группы поверхностей: *1*, *3*, *5*, *о2*, *о4*, *о6* на многоцелевом станке № 1 либо на карусельном станке; *33*, *о16*, *о18*, *17* на многоцелевом станке № 1 либо на расточном; 33 на фрезерном; *1* на фрезерном; 3) *о4*, *о16* на сверлильном.

Таким образом, от комплекта баз *о12пс*, *о12*, *10* нужно обрабатывать группы поверхностей *1*, *3*, *5*, *о2*, *о4*, *о6* и *33*, *о16*, *о18*, *17*, либо на различных станках, либо на одном, но за две операции. Пусть поверхности *1*, *3*, *5*, *о2*, *о4*, *о6* обрабатываются на карусельном станке, а поверхности *33*, *о16*, *о18*, *17* на многоцелевом станке.

Витебский государственный технологический университет

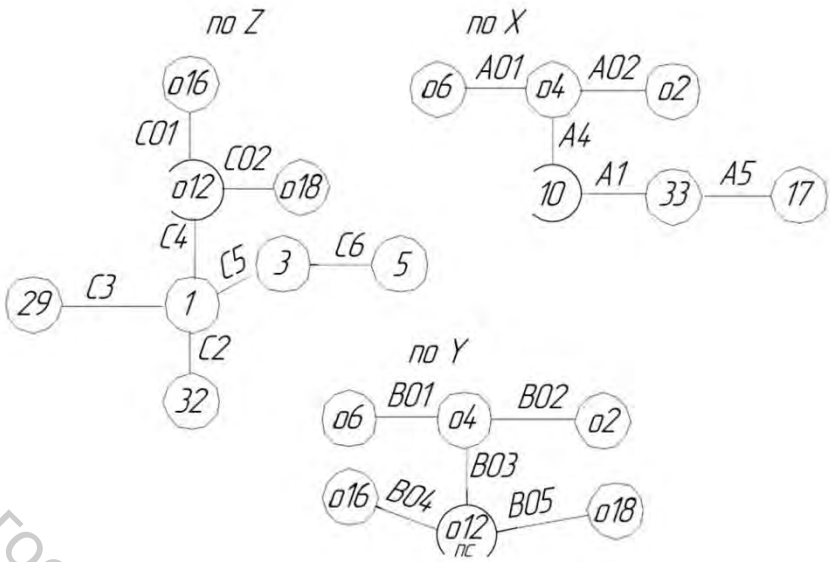


Рисунок 3.70 – Графы размерных связей для предварительного этапа обработки (первое отсечение)

В том случае, если был бы задан многоцелевой станок с поворотным столом, то рассмотренные группы поверхностей легко можно было бы обработать на одной операции.

Необработанными остаются поверхности *29*, *30*. Графы после последнего удаления «лишних» поверхностей показаны на рисунке 3.71. Их особенность состоит в том, что на графе в каком-то координатном направлении может не остаться необработанных поверхностей. Тогда на соответствующих графах отражаются базы для предыдущей операции, а также главные поверхности, обработанные на предыдущем этапе. Именно эти поверхности и могут быть базами для рассматриваемой операции.

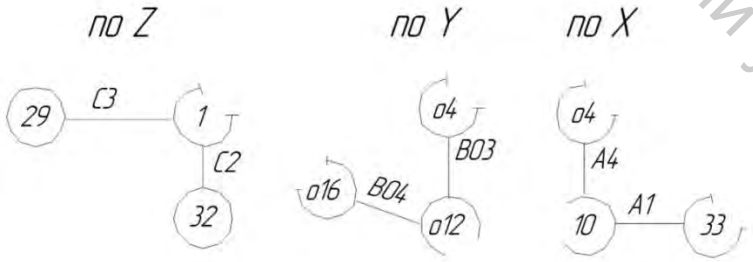


Рисунок 3.71 – Графы размерных связей для предварительного этапа обработки (второе отсечение)

В рассматриваемом случае это поверхности *о16*, *о4*, *о12* (на графе по оси *Y*) и *о4*, *33*, *10* (на графе по оси *X*). Анализ графов показывает, что для обработки поверхностей *29*, *32* можно назначить комплектами

Витебский государственный технологический университет

технологических баз следующие группы поверхностей: *1*, *о4* и *о4* или *1*, *33* и *о4* и др.

Аналогичный анализ производится для чистового и отделочного этапов, причем следует учитывать ряд особенностей.

Так, если на рассматриваемом этапе (или по одной из осей этапа) нет исходных поверхностей, то на первой операции рекомендуется обрабатывать те поверхности, у которых на графах размерных связей больше всего связей с другими поверхностями. А в качестве технологических баз ориентации для первой операции выбирать поверхности, связанные с ними ребром. Примером такой ситуации является чистовой этап обработки детали, показанной на рисунке 3.66. Начальные графы размерных связей для этого этапа показаны на рисунке 3.72. Штриховой линией отмечены поверхности, которые отсутствуют в начале этапа и появятся в результате его реализации этапа.

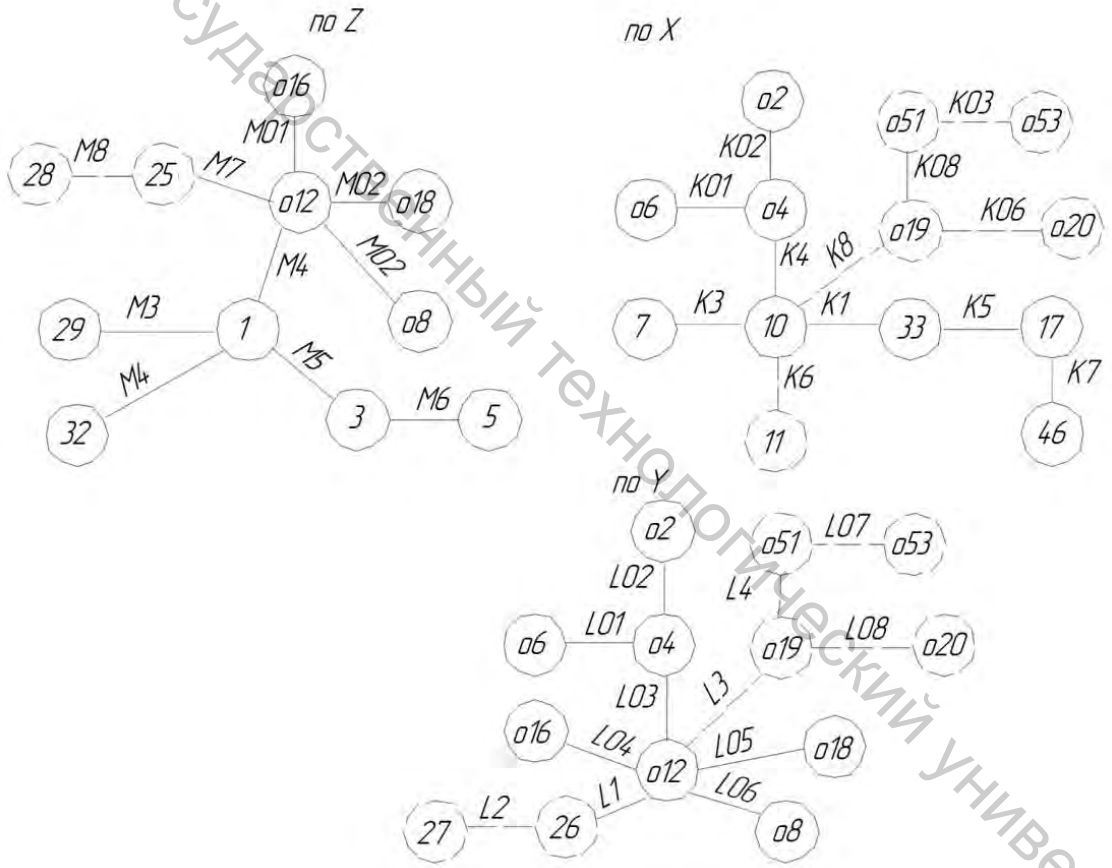


Рисунок 3.72 – Графы размерных связей для чистового этапа обработки (исходные)

Анализ графов показывает, что в первую очередь следует обрабатывать поверхности оси *Z – 1* либо *о12*; по оси *X – 10* либо *о4*; по оси *Y – о4* либо *о12*. Группа поверхностей *о12*, *10*, *о8*, *7* может быть обработана на станках № 1 и № 3, а базовыми поверхностями для их обработки могут быть выбраны поверхности по оси *Z – 1*, *о18*, *о16*, по оси *X – о4*, *7*, *33*, по оси *Y – о8*, *о4*, *о16*, *о18*. Пусть в качестве базы на первой опе-

Витебский государственный технологический университет

рации используется комплект *1*, *o4*, *o4n*. Дальнейшее назначение комплектов технологических баз осуществляется так же, как для предварительного этапа. Причем следует учитывать, что если размер на графе связывает две обрабатываемые поверхности *и одна поверхность вначале является базой для другой, а на следующей операции от этой поверхности обрабатывается базовая, то на обозначении размера при формировании схем базирования и размерном анализе технологического процесса* (см. далее операции 025, 035) *ставятся индексы 1 и 2.*

На чистовом и отделочном этапах правило единственной связи между комплексом обрабатываемых и необрабатываемых поверхностей не выполняется. На графе по оси *Z* отделочного этапа *Z* (рис. 3.73) существует пять связей между комплексом обрабатываемых и необрабатываемых на этапе поверхностей. В таких случаях после использования одной исходной поверхности в качестве базы из дальнейшего рассмотрения исключаются все исходные поверхности этапа (т.е. на графах отсекаются соответствующие им вершины).

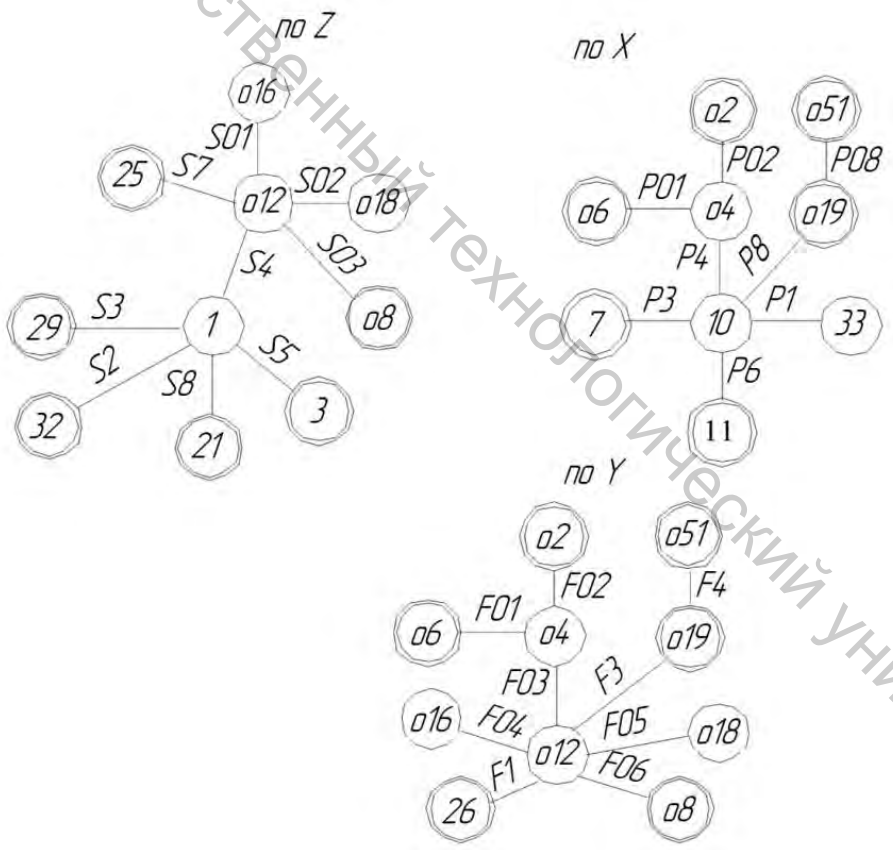


Рисунок 3.73 – Графы размерных связей для отделочного этапа обработки (исходные)

При выборе базы на первой операции следует также учитывать то, что если поверхность по оси является неудобной для базирования, то может быть принято решение об использовании одной из обрабатывае-

Витебский государственный технологический университет

мых на этапе поверхностей в качестве базы. Однако при определении вида компонента комплекта следует стремиться к тому, чтобы эта поверхность не использовалась в качестве установочной, двойной направляющей или направляющей баз.

По оси *Z* для первой операции отделочного этапа (рис. 3.73) целесообразно выбрать в качестве базы на первой операции поверхность *1*, т.к. исходные для этапа главные поверхности *25*, *29*, *32*, *21*, *3*, *o8* модулей являются неразвитыми и затруднят процесс установки заготовки. Для реализации ***второго метода*** необходимо после шагов 1-3 выполнить следующие действия.

Шаг 6. Совместно анализируя графы для этапа, определяются комплекты баз для всех обрабатываемых на этапе главных осей (О) согласно алгоритму

$$\overline{n}_i(O) \to (R_X \wedge R_Y) \vee (R_Y \wedge R_Z) \vee (R_Y \wedge R_Z);$$

$$\{v_{iX} = (\overline{n}_i, \overline{n}_j)_X\} \wedge \{v_{iY} = (\overline{n}_i, \overline{n}_p)_Y\} \Rightarrow \overline{n}_j - \overline{n}_p;$$

$$\{v_{iX} = (\overline{n}_i, \overline{n}_j)_X\} \wedge \{v_{iZ} = (\overline{n}_i, \overline{n}_p)_Z\} \Rightarrow \overline{n}_j - \overline{n}_p;$$

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

$$\overline{n}_i(O) \to U_{n_i^{обр-нобр}} \vee U_{n_i^{обр-обр}} \to y_i = <\overline{n}_i, \overline{n}_l> \Rightarrow \overline{n}_j - \overline{n}_p - \overline{n}_l.$$

Шаг 7. Совместно анализируя графы для этапа, определяются комплекты баз для всех обрабатываемых на этапе главных плоскостей (Р) согласно алгоритму

$$\overline{n}_i(P) \to R_X \vee R_Y \vee R_Z;$$

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

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

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

$$\{y_i = <\overline{n}_i, \overline{n}_p>\} \wedge \{y_i = <\overline{n}_i, \overline{n}_l>\} \Rightarrow \overline{n}_j - \overline{n}_p - \overline{n}_l.$$

На рисунке 3.74 показана иллюстрация работы алгоритма формирования комплекта баз для поверхности вращения (оси), а на рисунке 3.75 – для плоскости.

То есть номер обрабатываемой поверхности (или оси обрабатываемой поверхности) отыскивается на графе (по одной оси для плоской поверхности, по двум координатным осям для оси) 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 комплект дополняется двумя поверхностями, для оси комплект дополняется одной поверхностью.

Витебский государственный технологический университет

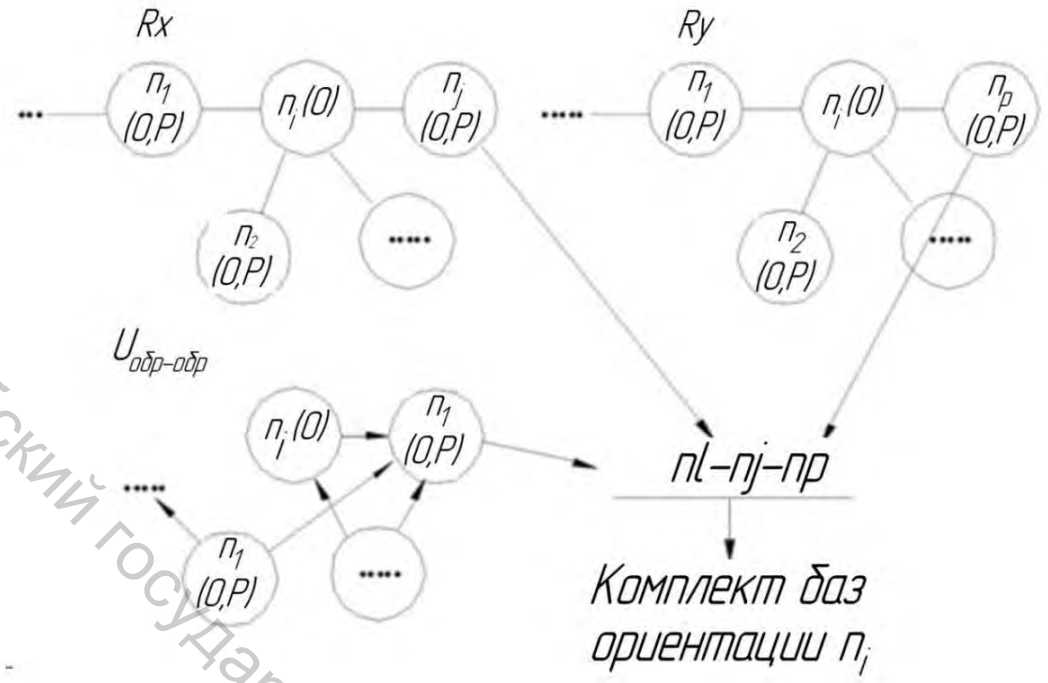


Рисунок 3.74 – Схема работы алгоритма определения комплекта баз ориентации для поверхности вращения (оси)

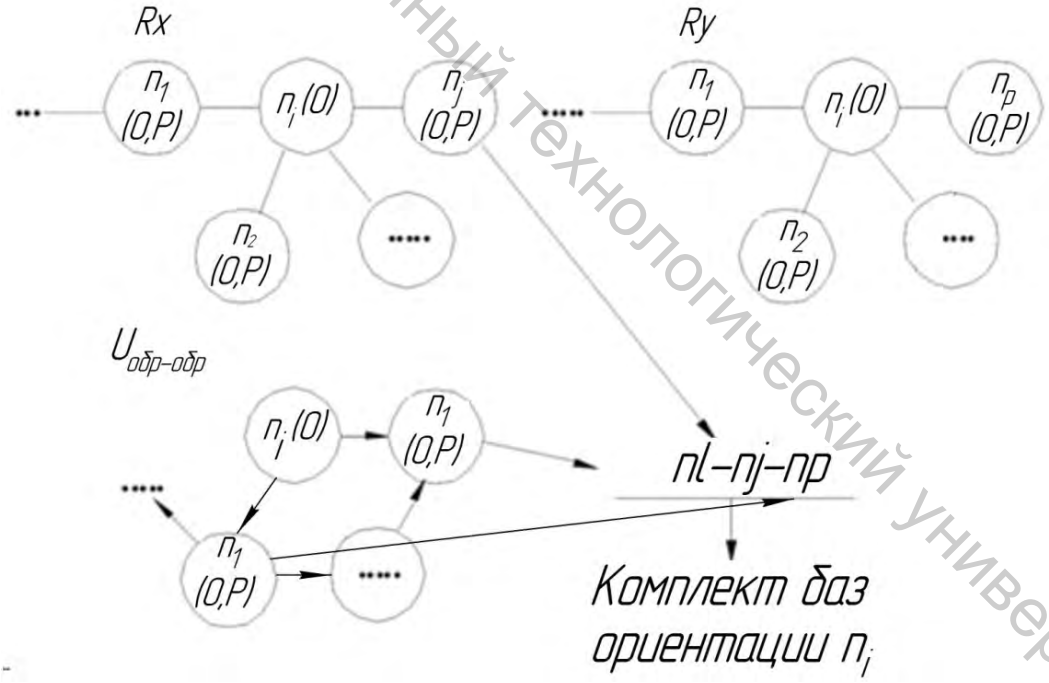


Рисунок 3.75 – Схема работы алгоритма определения комплекта баз ориентации для плоскости

Фрагмент таблицы возможных комплектов баз ориентации для рассматриваемой детали представлен в таблице 3.4.

Витебский государственный технологический университет

Таблица 3.4 – Комплекты баз ориентации рассматриваемой детали для предварительного этапа

012 (08 016 018)	*32*	*29*	*7*	*33*	*10*
30-o24-o24*nc* ***30****-1-****o24****nc* ***30****-1-o4* *10-* ***o24-o24****nc* *10-1-****o24****nc* *10-1-o4* ...	***30-o24****nc-1* *o12nc-10-1*	***30-o24****nc-1* *o12nc-10-1*	***o24-o24****nc-10* *1-o12nc-10* *o12-o12nc-10*	***o24-o24****nc-10* ***o24-o24****nc-7* *1-o12nc-10* *1-o12nc-7* *1-o12nc-o12*	***30-o24-o24****nc* *7-****o24-o24****nc* *33-****o24-o24****nc* *33-1-o24nc* ...

Шаг 8. Распределение переходов по типоразмерам станков. Формирование массива выбора оборудования.

На рисунке 3.76 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. 3.5) записываются ***комплекты 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 3.5.

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.

Шаг 9. *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.

Как было отмечено ранее, 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 не-

Витебский государственный технологический университет

обрабатываемых вовсе для первой операции обработки) и необрабатываемых на данном этапе (в таблице 3.4 они выделены жирным).

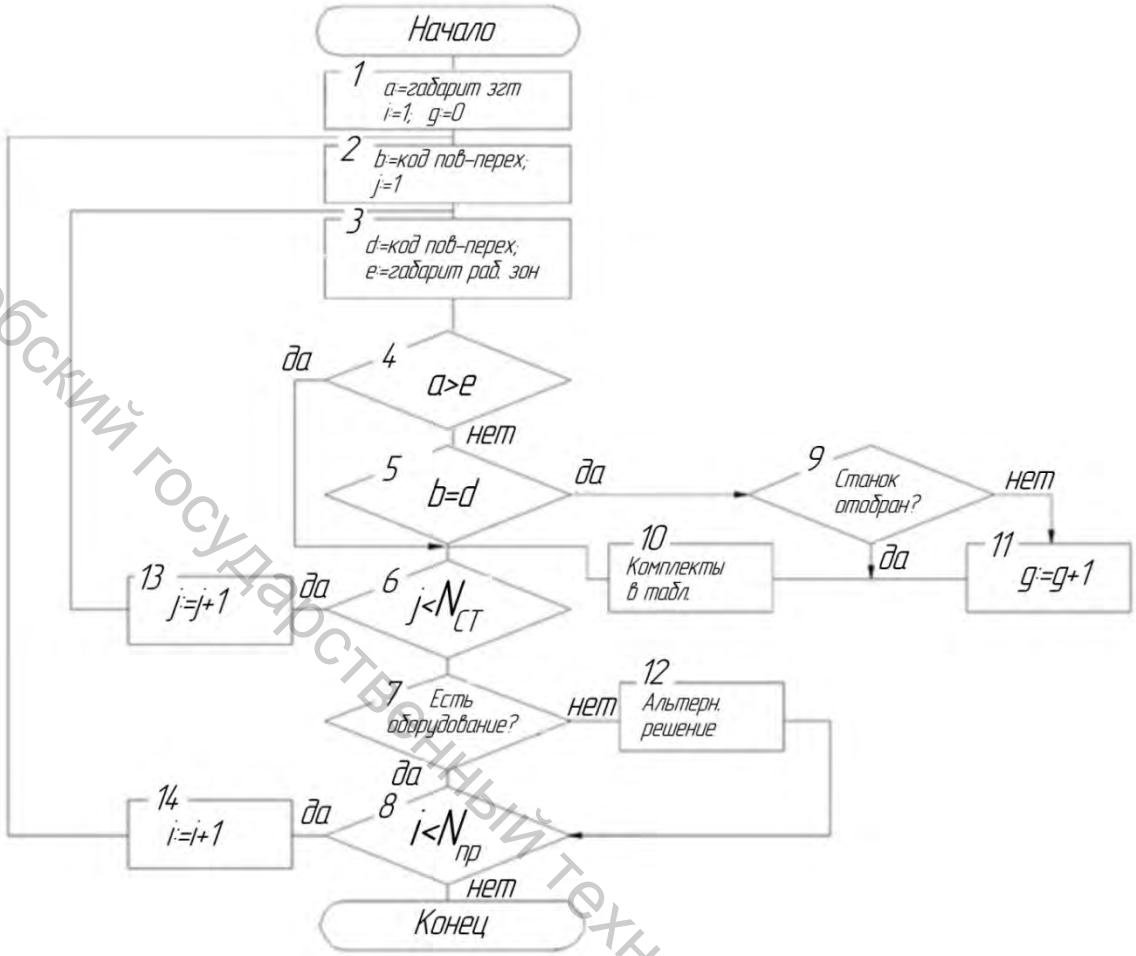


Рисунок 3.76 – Блок-схема распределения переходов по типоразмерам станков: i – порядковый номер перехода в этапе; $N_{пр}$ – количество переходов в этапе; j – номер станка в массиве; $N_{ст}$ – количество станков в массиве; q – номер отобранного станка

Таблица 3.5 – Формат таблицы выбора оборудования

Поверхность-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} ...	…	…
$N_{пр}$	...	...	…	...

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.

Витебский государственный технологический университет

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

Так, например, на предварительном этапе (табл. 3.6) на станке 1 необходимо сгруппировать поверхности о12 (о8 о16 о18) 10, т.к. для этого станка в таблице выбора имеется наибольшее количество строк (переходов) с одинаковыми комплектами баз 30-о24-о24пс, состоящими только из исходных поверхностей.

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.

Таблица 3.6 – Пример фрагмента таблицы выбора оборудования на первой операции для предварительного этапа

Поверхность-переход i	**Номер станка q**			
	1	2	3	…
о12 *о8 о16 о18*	***30-о24-о24пс*** ***30-1-о24пс*** ***30-1-о4*** *10-* ***о24-о24пс*** *10-1-**о24пс*** *10-1-о4* ...	–	***30-о24-о24пс*** ***30-1-о24пс*** ***30-1-о4*** *10-* ***о24-о24пс*** *10-1-**о24пс*** *10-1-о4* ...	...
32	***30-о24пс-1*** *о12пс-10-1*	***30-о24пс-1*** *о12пс-10-1*	–	...
29	–	***30-о24пс-1*** *о12пс-10-1*	–	...
7	***о24-о24пс-10*** *1-о12пс-10* *о12-о12пс-10*	–	***о24-о24пс-10*** *1-о12пс-10* *о12-о12пс-10*	...
33	–	***о24-о24пс-10*** ***о24-о24пс-7*** *1-о12пс-10* *1-о12пс-7* *1-о12пс-о12*	–	...
10	***30-о24-о24пс*** *7-**о24-о24пс*** *33-**о24-о24пс*** *33-1-о24пс* ...	–	–	...

При определении комплектов баз необходимо определять поверхности, которые можно обработать от *настроечных* баз. Формально, это такие обрабатываемые поверхности в столбце «поверхность-переход»

Витебский государственный технологический университет

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.

Так, например, комплект ***о24-о24****пс-10* отличается от комплекта ***о24-о24****пс-**30*** для поверхностей *о12* (*о8 о16 о18*) *10* только одной поверхностью – *10*. Если в комплект ***о24-о24****пс-**30*** вместо поверхности ***30*** подставить поверхность *10*, то получится комплект, идентичный комплекту для поверхности *7*. Поверхность 10 может являться настроечной базой.

Шаг 10. *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 11. *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 операции* 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 10.

Витебский государственный технологический университет

Шаг 12. *Выбор станка и комплекта баз для последующих операций.*

Повторяется шаг 11.

В результате работы методик формируется несколько вариантов маршрута обработки (табл. 3.7) 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 3.7 – Структура выходных параметров работы алгоритма

Обрабатываемые поверхности	**i i-1 i-3**	**i-2 i-4**	**i+1 i+2**	**…**
Комплект баз	$\mathbf{nl_{i1}\text{-}nj_{i1}\text{-}np_{i1}}$	$\mathbf{nl_{i-13}\text{-}nj_{i-13}\text{-}np_{i-13}}$	$\mathbf{nl_{i+12}\text{-}nj_{i+12}\text{-}np_{i+12}}$	**…**
Станок	**q**	**q+1**	**q-1**	**…**

В таблице 3.8 представлена возможная последовательность обработки и смены баз для рассматриваемой детали.

Таблица 3.8 – Возможная последовательность обработки и смены баз для рассматриваемой детали

Этап	**Операция**	**Станок**	**Комплект баз ориентации**	**Обрабатываемые поверхности**
Предварительный	005	№ 1	№ 2 о24пс(O_l P_j), о24(O_l),30(P_i)	о12,10,7,о8
	010	№ 2	№ 2 о12пс(O_l P_j),о12(O_l),10(P_i)	1,3,5 о2,о4,о6
	015	№ 1	№ 2 о12пс(O_l P_j),о12(O_l),10(P_i)	33,о16,о18,17
	020	№ 4	№ 2 1(P_i), о4 (O_l),о4(O_l P_j)	32,29
Чистовой	030	№ 1	№ 2 1(P_i), о4 (O_l),о4(O_l P_j)	о12,10,7,о8
	035	…	…	…
Отделочный	…	…	…	…

3.5.3 Синтез теоретических схем базирования

Первым шагом решения задачи *синтеза схемы базирования* является *идентификация комплекта баз ориентации*. Для этого рассматриваются поверхности сформированных на предыдущем этапе комплектов баз ориентации, и определяется характер поверхности [2–5].

Всего возможно четыре варианта сочетаний поверхностей (рис. 3.77). Далее определяется принадлежность рассматриваемого комплекта к одному из четырех описанных выше. Комплект О-О-О практически не используется.

Для определения числа налагаемых связей следует пользоваться следующими утверждениями.

Витебский государственный технологический университет

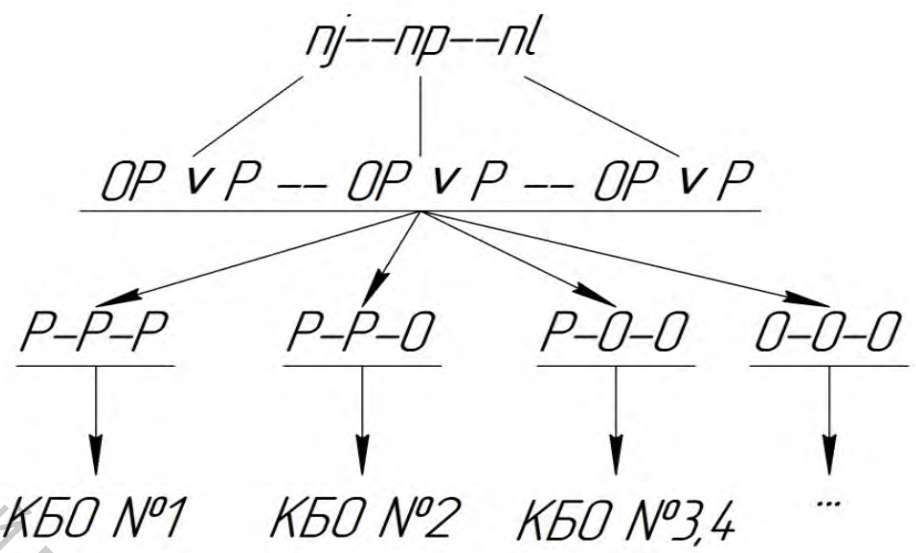


Рисунок 3.77 – Модель идентификации комплекта баз

Утверждение 1.

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

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 3.78 преднамеренно поверхность, к которой указан допуск перпендикулярности обрабатываемой плоскости, взята в качестве одиночной базы. Одиночная база определяет точку, относительно которой под действием силы резания часть детали может поворачиваться. Тройная однонаправленная база определяет плоскость. В этом случае поворот исключается. Тем самым обеспечивается допуск взаимного расположения.

Витебский государственный технологический университет

Утверждение 4.

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

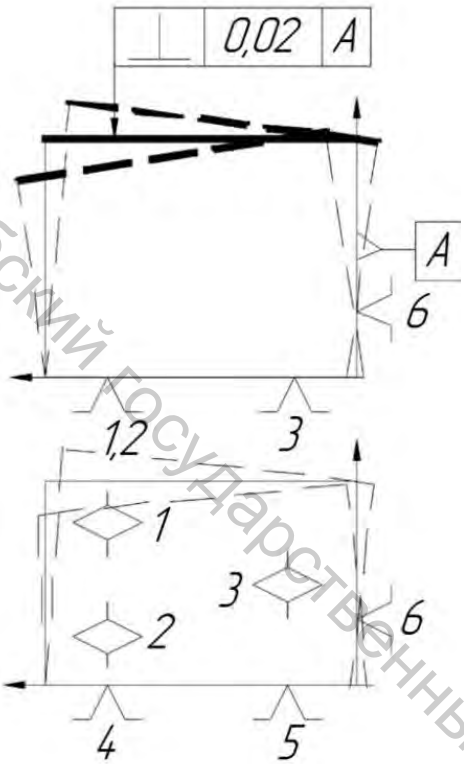


Рисунок 3.78 – Необеспечение допуска перпендикулярности

Например, на рисунке 3.79 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.

В приложении Г приведен массив продукционных моделей для назначения вида компонентов комплекта технологических баз и массив примеров, состоящий из 62 алгоритмов. *Структура массива* полностью соответствует структуре схемы вариантов корректного задания допусков взаимного расположения относительно комплектов баз (см. рис. 3.14). Каждому варианту задания допуска ставится в соответствие алгоритм определения вида компонента комплекта. Для комплекта баз ориентации № 2 на рисунке 3.80 приведен фрагмент массива (некоторые его элементы (алгоритмы в формальном виде)).

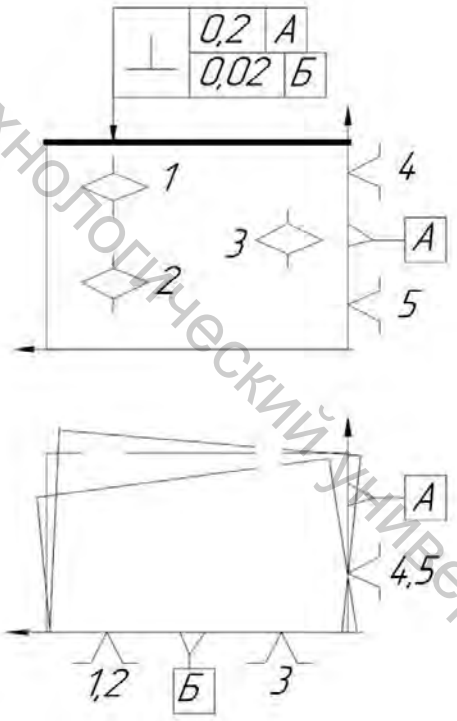


Рисунок 3.79 – Обеспечение требования к перпендикулярности плоскости

Витебский государственный технологический университет

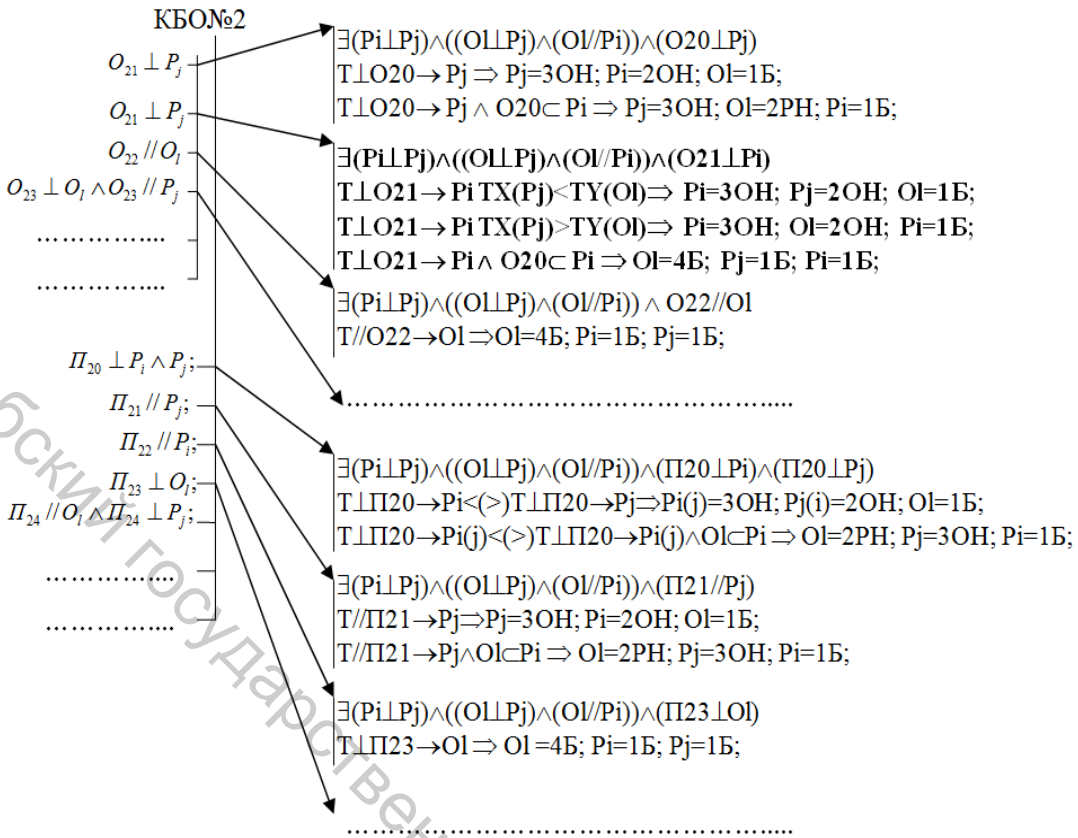


Рисунок 3.80 – Элементы массива продукционных моделей для комплекта баз № 2

Например, алгоритм O_{21} гласит: если существует комплект технологических баз, состоящий из двух взаимно перпендикулярных плоскостей $P_i \perp P_j$ и оси $(O_l \perp P_j) \wedge (O_l // P_i)$, перпендикулярной одной из них (параллельной другой), и задан допуск перпендикулярности оси O_{21} относительно плоскости P_i, а допуск линейного размера относительно P_j меньше допуска линейного размера относительно O_l, то плоскость P_i назначается тройной однонаправленной (установочной) базой, плоскость P_j двойной однонаправленной (направляющей), ось O_l одиночной (опорной). Если допуск линейного размера относительно P_j больше допуска линейного размера относительно O_l, то плоскость Pi назначается тройной однонаправленной (установочной) базой, ось O_l двойной однонаправленной (направляющей), плоскость P_j одиночной (опорной) базами. В частном случае, если плоскость P_i совпадает с осью O_l, то ось O_l назначается четверной (двойной направляющей), базой плоскости P_i и P_j назначаются одиночными (опорными) базами (рис. 3.81).

Алгоритм O_{11} гласит: если существует комплект технологических баз, состоящий из трех взаимно перпендикулярных плоскостей $P_i \perp P_j \perp P_k$, и заданы допуски параллельности главной оси ФМ O_{11} относительно плоскостей P_i и P_j, а численное значение допуска параллельности оси относительно плоскости $P_{i(j)}$ меньше численного значения

Витебский государственный технологический университет

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) базами. Аналогично определяются компоненты комплекта, если задан допуск параллельности оси относительно плоскостей P_i и P_k, P_j и P_k (см. рис. 3.82).

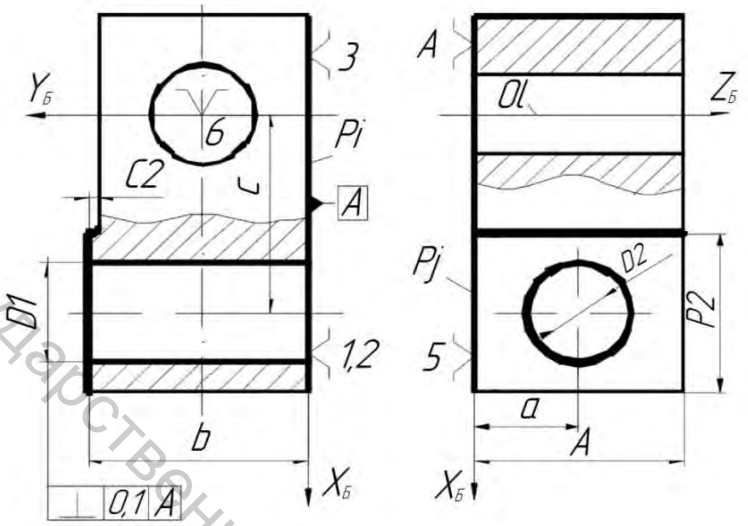


Рисунок 3.81 – Пример назначения вида компонентов комплекта технологических баз по правилу О21

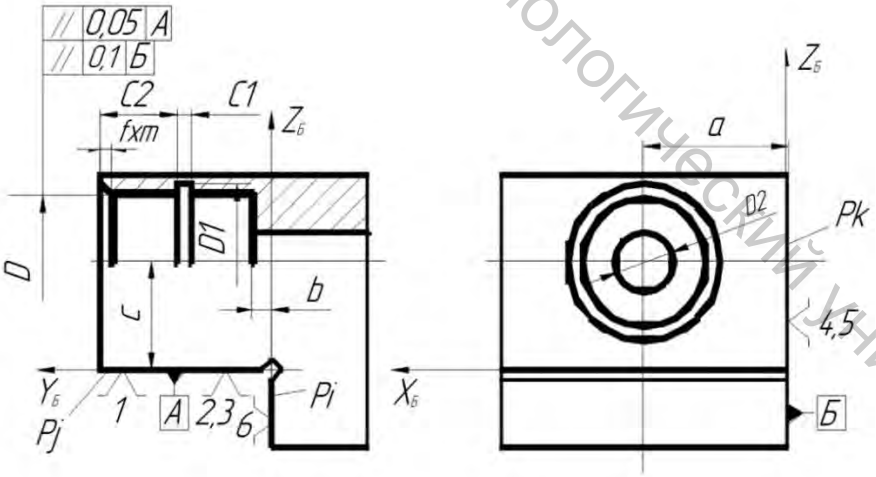


Рисунок 3.82 – Пример назначения вида компонентов комплекта технологических баз по правилу О11

При использовании данной методики логика синтеза проектной базы заменяется логикой выбора, что не совсем удобно для человека, но легко реализуемо с помощью ЭВМ.

Витебский государственный технологический университет

Задача проектирования схем базирования актуальна и для немашинного проектирования. Синтез схемы базирования «*вручную»* рекомендуется выполнять согласно приведенным ниже шагам.

Первый шаг. Построить геометрическую модель заготовки с выделением обрабатываемых поверхностей и указанием угловых и размерных связей, которые необходимо обеспечить на операции.

Второй шаг. Проверив правильность задания относительного расположения ФМ, согласно 62 правилам однозначности и корректности, и, выявив, если необходимо, неуказанные допуски относительного расположения (перпендикулярность, соосность, симметричность), определить комплект технологических баз ориентации (согласно утверждению).

Третий шаг. Сформировать базовую систему координат.

Четвертый шаг. Определить вид каждого из компонентов установленного комплекта баз (число налагаемых связей) согласно утверждениям 3, 4 и 5.

В качестве примера проведем обоснование схемы базирования, приведенной на рисунке 3.25, согласно указанному выше алгоритму.

Первый шаг.

Обрабатываемая поверхность – плоскость, перпендикулярная плоскости А, расположенная под углом $45^{o} \pm 20'$ к плоскости, проходящей через ось отверстия $\varnothing\ 20^{+0,1}$ и ось скругления R10, и находящаяся на расстоянии 30±0,2 от оси отверстия $\varnothing\ 20^{+0,1}$.

Второй шаг. Согласно утверждению 2 комплект технологических баз будет состоять из плоскости А и двух перпендикулярных к ней осей (ось отверстия $\varnothing\ 20^{+0,1}$ и ось скругления R10, что соответствует комплекту № 3 (табл. 3.1)). Расположение обрабатываемой плоскости согласно пункту П34 задано корректно и однозначно.

Третий шаг. Строится базовая система координат.

Четвертый шаг. Согласно утверждениям 3, 4 и 5 плоскость А назначается установочной базой (обеспечивает перпендикулярность с максимальной точностью). Ось отверстия $\varnothing\ 20^{+0,1}$ назначается двойной опорной базой, а ось скругления *R*10 – опорной.

В том случае, если относительно комплекта ориентируется несколько главных поверхностей ФМ, то вид компонента комплекта определяется с помощью ранжирования численных значений допусков по компонентам комплекта и последующего определения приоритета компонента (в зависимости от этого значения). Например, если относительно комплекта ТБ, состоящего из трёх взаимно перпендикулярных плоскостей, ориентируется две оси и заданное численное значение допуска перпендикулярности одной оси относительно одной плоскости меньше численного значения допуска перпендикулярности второй оси относительно второй плоскости, то первая плоскость назначается установочной базой, а вторая – направляющей.

Витебский государственный технологический университет

Для определения вида компонентов комплекта необходимо определить значения указанных и неуказанных допусков взаимного расположения для обрабатываемых поверхностей относительно базовых компонентов, а затем привести эти допуски к длинам баз и длинам обрабатываемых компонентов, равным 100 мм. Полученные приведенные допуски позволяют определить вид компонента комплекта баз согласно правилу 5.

Так, например, для рассматриваемой детали на операции 005 от баз ориентации (O_l, P_j, протяженность 168), *30* (P_i, протяженность 270х160) обрабатываются поверхности *10* (допуск перпендикулярности (⊥) относительно *о24пс* (O_l) – 0,20, протяженность 160; допуск перпендикулярности (⊥) относительно *о24* (P_j) – 0,25, протяженность 295; допуск на размер (*р*) относительно 30 (P_i) – 0.7, протяженность 295) и *о12* (допуск соосности (◎) в направлении о24пс (O_l) – 0,8, протяженность 68; допуск соосности (◎) в направлении *о24* (P_j) – 0,8, протяженность 68; допуск перпендикулярности (⊥) относительно *30* (P_i) – 0,20, протяженность 68). Для определения приведенного допуска значение допуска обрабатываемой поверхности, умноженное на 1000, делится на произведение протяженностей соответствующих обрабатываемой и базовой поверхностей. Та базовая поверхность, приведенный допуск по отношению к которой более жесткий, должна накладывать больше связей. На операции 005 приведенный допуск в направлении *о24пс* (O_l) самый жесткий – 0,074, следовательно – эта ось является двойной направляющей базой, две другие базы ориентации – опорные базы.

Данные анализа для рассматриваемой детали представлены в таблице 3.9.

Таблица 3.9 – Определение числа связей

Операция	База			Обрабатываемые поверхности				Приведенный допуск (к8х10000/ /к3хк6)	Вид компонента
	Элемент комплекта баз	Протяженность	К баз	Ориентируемые гл. пов.	Протяженность	Вид допуска	Значение		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
005	о24пс (ось) о24	168	O_l	10 о12	160 68	⊥ ◎	0,20 0,8	0,074 0,53	дв. напр. опорн.
		168	P_j	10 о12	295 68	⊥ ◎	0,25 0,8	0,05 0,53	
	30 (плоск).	270х 160	P_i	10 о12	295 68	Р ⊥	0,7 0,6	0,087 0,32	опорн.
010	10	295х 160	P_i	1 о4	260 30	⊥ Р	0,04 0,06	0,0052 0,068	установочн
	о12пс (ось) о12	68	O_l	1 о4	260 30	⊥ Р	0,2 0,16	0,113 0,78	дв. опорная опорная
		68	P_j	1 о4	260 30	Р ⊥	0,2 0,12	0,113 0,59	
…	…	…	…	…	..	…	…	…	…

В таблице 3.10 представлен маршрут обработки рассматриваемой детали.

Витебский государственный технологический университет

Таблица 3.10 – Маршрут обработки заготовки

Этап	Опе-рация	Теоретическая схема базирования
1	2	3
1	005	
1	010	
1	015	

Витебский государственный технологический университет

Окончание таблицы 3.10

4	030	
…	…	…
4	040	
…	…	…

3.5.4 Синтез теоретических схем установки

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. 3.83, табл. 3.11, приложение В и Д). Случаи, в которых элемент схемы базирования заменяется ре-

Витебский государственный технологический университет

жущим инструментом (т.н. передача функций базирующей подсистемы – инструменту (бесцентровое шлифование, протягивание отверстия короткой втулки и др.), в таблице соответствия не представлены ввиду редкого использования.

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

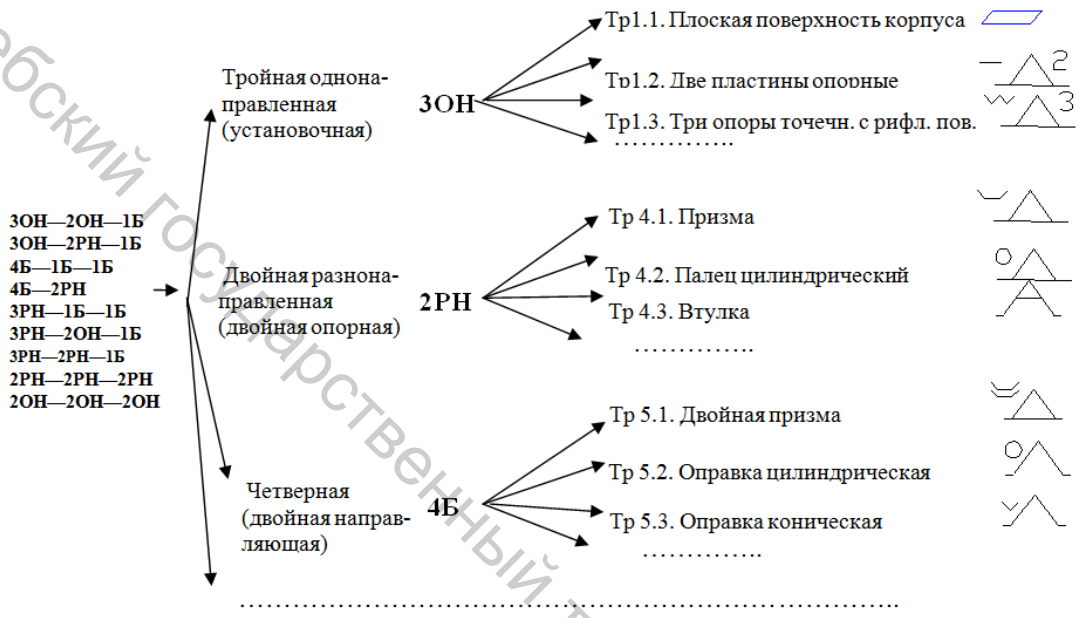


Рисунок 3.83 – Фрагмент схемы соответствия вида компонента возможным установочным элементам

Для реализации метода синтеза технических решений необходимо отобрать варианты установочных компонентов для реализации проектных баз комплекта ТБ. Выбранные компоненты заносятся в морфологическую таблицу 3.12. Здесь Ф1, Ф2, Ф3 – функции наложения определенного числа связей или вида технологических баз.

Таблица 3.11 – Элементы таблицы сокращения вариантов

База	Код	Тип производства					Габариты и масса обрабатываемой детали				…
		е	мс	с	кс	м	м	с	к	ок	…
3ОН	Тр 1.1	**x**	**x**	**x**			**x**	**x**			…
	Тр 1.2	**x**	**x**	**x**	**x**	**x**		**x**	**x**	**x**	…
	Тр 1.3	**x**	**x**	**x**	**x**	**x**		**x**	**x**	**x**	
	…										…
2ОН	Тр 2.1	**x**	**x**	**x**			**x**	**x**			…
	Тр 2.2	**x**	**x**	**x**	**x**			**x**	**x**	**x**	…
	…	…	…	…	…	…	…	…	…	…	…
…	…	…	…	…	…	…	…	…	…	…	..

Витебский государственный технологический университет

При выборе вариантов технических решений, заносимых в морфологическую таблицу, с помощью таблицы сокращения вариантов учитываются следующие ограничения: тип производства, габариты и масса обрабатываемой детали, показатели качества базы, поверхность базирования (наружная, внутренняя), тип поверхности, характер базы (явная, скрытая), вид обработки (отделочная, чистовая, предварительная).

Таблица 3.12 – Морфологическая таблица

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

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. 3.13).

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 3.13 – Таблица 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.

Пусть необходимо спроектировать теоретическую схему установки для обработки заготовки рассматриваемой детали на операции 005.

Витебский государственный технологический университет

Из приложения Д отберем приемлемые технические решения и занесем их в морфологическую таблицу (табл. 3.14).

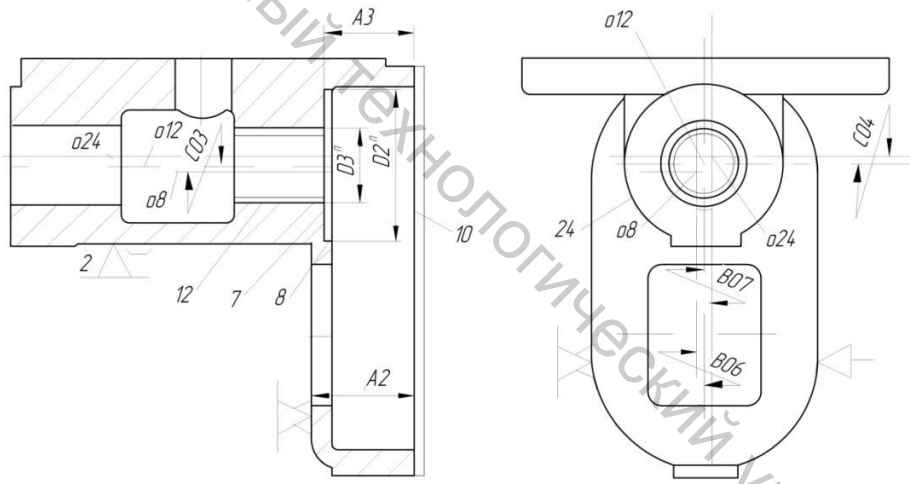
Таблица 3.14 – Отобранные с помощью таблицы сокращения вариантов, компоненты схемы установки

База	Установочный компонент	Код
Двойная направляющая	Двойная призма	Тр 5.10.
Опорная	Опора точечная неподвижная с плоской поверхностью	Тр 3.1.
	Опора точечная неподвижная с рифленой поверхностью	Тр 3.3.
	Опора плавающая с плоской поверхностью	Тр 3.4.
	Опора плавающая с рифленой поверхностью	Тр 3.6.
Опорная	Опора точечная неподвижная с плоской поверхностью	Тр 3.1.
	Опора точечная неподвижная с рифленой поверхностью	Тр 3.3.
	Зажим самоцентрирующийся	Тр 3.9.

Окончательно принимаем сочетание Тр5.10. Тр3.3. Тр3.3.

Проекты схем установки оформляются в виде таблицы схем установки (табл. 3.15).

Таблица 3.15 – Теоретические схемы установки

Этап	Операция	Теоретическая схема установки
1	005	
1	010	…

Разработанные схемы установки являются заданиями на проектирование или выбор приспособления.

При базировании выверкой по разметке необходимо определить базы разметки. Однако каких-либо правил определения баз для разметки нет. Поэтому часто принятие решений о базах разметки основано на личном опыте и интуиции проектировщика. Базы для разметки на чертежах детали обозначаются в виде ромба.

Предлагается *теоретические схемы баз разметки* определять с помощью правил определения комплектов баз на первой операции этапа по методике синтеза маршрута обработки заготовки (на основании ана-

Витебский государственный технологический университет

лиза графов размерных связей). «Вид компонента комплекта» определяется согласно рассмотренной выше методике определения вида компонента комплекта в зависимости от точности ориентации той или иной обрабатываемой поверхности относительно комплекта исходных баз.

Схема рисок разметки и порядок разметки поверхностей определяется по методике определения смены баз. В данном случае необходимость в определении вида компонента (установочная, направляющая, опорная и т.д.) баз отпадает. Поверхности, размеченные от баз разметки, являются *настроечными базами* для разметки других поверхностей.

На этапе *установки заготовки на станке* достигается требуемая точность статической настройки системы СПИД при размерной настройке инструмента по разметочным рискам.

Предлагается считать разметку условно первой операцией механической обработки. Тогда комплект технологических баз для нанесения линий и точек разметки можно определять по описанной выше методике.

3.6 Размерный анализ технологического процесса

3.6.1 Определение припусков и допусков на технологические размеры

Размерный анализ технологического процесса – это такой инструмент в проектировании технологического процесса, который позволяет до реализации технологического процесса аналитическим путём проверить возможность достижения точности чертёжных размеров и рассчитать технологические размеры и размеры заготовки. Для проведения размерного анализа необходимо определить минимальные припуски на обработку, допуски на технологические размеры, составить размерную схему технологического процесса, сформировать исходный и производный графы, составить уравнения размерных цепей, произвести необходимые расчёты [2–5, 84–91].

В современных рыночных условиях небезразлично, каким путем получено заданное качество продукции – его следует достигать при наименьших затратах материалов, средств, времени, т.е. при наименьшей себестоимости изготовления деталей. Первое требование можно назвать техническим, второе – экономическим.

Для выполнения этих основных требований большое значение имеют вопросы расчета припусков на обработку на металлорежущих станках, операционных размеров и допусков на них. Чем эти параметры ближе к оптимальным, тем меньше расход металла на единицу продукции, затраты времени на обработку, расход электроэнергии и режущего

Витебский государственный технологический университет

инструмента и т.д., и тем меньше технологическая и общая себестоимость обработки деталей машин.

В процессе размерного анализа проектируемых технологических процессов следует различать напуски и припуски на обработку. *Напуском* принято называть ту часть материала заготовки, необходимость удаления которой при последующей механической обработке вызвана упрощением формы заготовки по отношению к форме готовой детали. *Припуском* называют ту часть удаляемого материала, наличие которого на заготовке вызвано необходимостью обеспечения заданных требований к точности и качеству поверхности в результате обработки резанием или другим методом со снятием слоя материала. В тех местах заготовки, где удаляемый материал выступает в роли припуска, номинальная форма поверхности заготовки, как правило, совпадает с заданной номинальной формой поверхности готовой детали. В этом случае припуск рассматривают как слой материала и оценивают расстоянием между соответствующими поверхностями.

Для расчетов припусков используются аналитический и нормативный методы. Из аналитических методов расчета припусков выделяют два основных: дифференциально-аналитический (поэлементный) и интегрально-аналитический. Широко распространен на практике нормативный метод определения припусков. Он основан на использовании стандартов, ведомственных нормалей и справочников, содержащих таблицы значений номинальных припусков.

Дифференциально-аналитический метод определения припусков является наиболее точным, он позволяет устанавливать оптимальные значения припусков для каждого сочетания условий обработки. Сущность этого метода состоит в определении для заданных условий выполнения операции факторов, влияющих на величину операционного припуска, а затем расчетным путем или по таблицам находят элементы припуска, достаточные для компенсации влияния каждого из факторов. Суммируя эти элементы, определяют величину операционного минимального припуска.

Различают операционные и общий припуски. *Операционный (переходный) припуск* определяется разностью технологических размеров, полученных на смежных операциях (переходах). *Общий припуск* является суммой операционных припусков на данной поверхности. Различают также номинальный и минимальный операционные припуски. Составляющими *минимального операционного припуска* в общем случае будут: Rz_{i-1} – высота микронеровностей, полученная на предшествующей стадии обработки (операции или переходе); H_{i-1} – удаляемый дефектный подповерхностный слой материала, полученный на предшествующей стадии обработки; ρ_{i-1} – пространственные отклонения (сумма) обрабатываемой поверхности, не входящие в допуск на выполняе-

Витебский государственный технологический университет

мый размер; ε_i – погрешность установки на рассматриваемой стадии обработки, не входящая в допуск на выполняемый размер. Номинальный операционный припуск равен разности между номинальными значениями технологических размеров, полученных на смежных операциях (переходах), т.е. $z_i = |C_{i-1} - C_i|$.

Все сказанное выше о припуске относится к припуску на сторону *(одностороннему припуску)*. При обработке поверхностей вращения допуски задаются на диаметр, поэтому и припуск принято задавать на диаметр (т.е. удваивать односторонний). Аналогично может быть задан припуск на ширину паза, выполняемого мерным инструментом.

На рисунке 3.84 показана схема односторонних припусков для случая обработки одной поверхности от одной базы. Тогда

$$z_i = C_{i-1} - C_i = z_{\min i} + TC_{i-1},$$

где $z_{\min i}$ – минимальный припуск на *i*-й переход; TC_{i-1} – допуск на технологический размер, выполняемый на *(i*-1)-м переходе.

Данное выражение является верным для всех *i,* кроме *i*-1, так как в литых или кованых заготовках допуск на размеры является симметричным ($\pm TC_0 / 2$). В этом случае

$$z_1 = C_0 + TC_0 / 2 = z_{\min 1} + TC_0 .$$

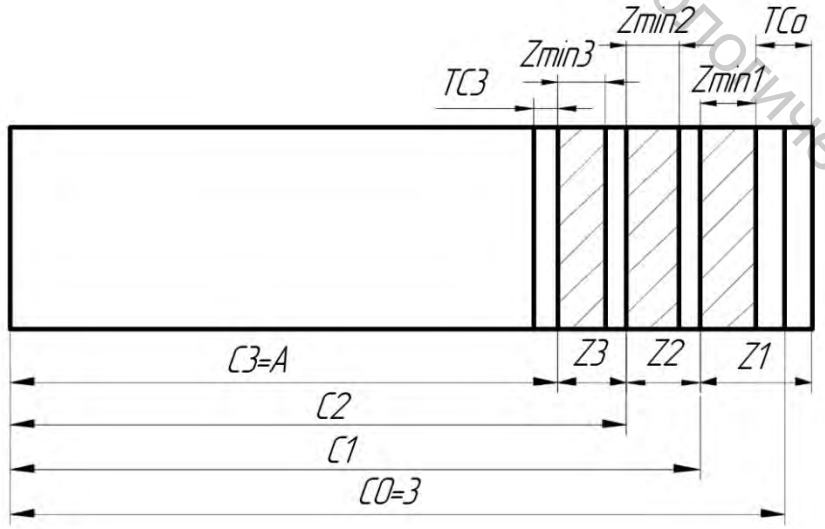


Рисунок 3.84 – Схема определения припусков при обработке одной поверхности от одной базы

На рисунке 3.85 а показана схема определения припусков при обработке двух параллельных поверхностей с последовательной схемой баз и полным удалением поверхностей заготовки. В этом случае для поверхности 1

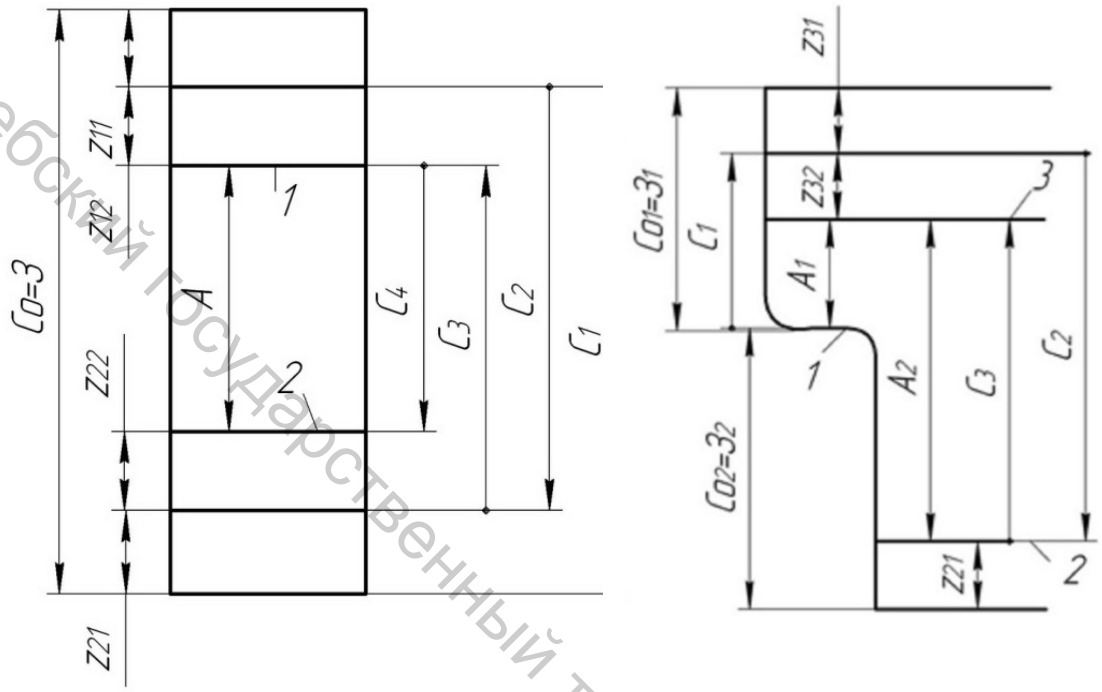
$$z_{11} = C + TC/2 - C; \quad z_{12} = C_2 - C_3;$$

Витебский государственный технологический университет

а для поверхности 2

$$z_{21} = C_1 - C_2; \quad z_{22} = C_3 - C_4;$$

где $z_{вi}$ – припуск, удаляемый на i-й операции $в$-го варианта.



а б

Рисунок 3.85 – Схемы определения припусков при обработке нескольких поверхностей со сменой баз

На рисунке 3.85 б показана схема определения припусков при обработке двух параллельных плоскостей (2 и 3), когда базой на первой операции является исходная поверхность 1. Тогда:

$$z_{31} = C_{01} + TC_{01}/2 - C_1;$$
$$z_{21} = C_{02} + TC_{02}/2 + C_1 - C_2; \quad \mathbf{z_{32} = C_2 - C_3}.$$

Приведенный пример показывает, что номинальный припуск может быть результатом решения размерной цепи, содержащей более трех звеньев.

Компоненты минимального припуска не всегда полностью включаются в его состав. Так, при обработке заготовок из чугуна и цветных сплавов компонент Н (дефектный слой) включается только при определении припуска на первую обработку литой поверхности. При последующих операциях этот компонент может не учитываться. Не включа-

Витебский государственный технологический университет

ются в минимальный припуск и пространственные отклонения, если они не могут быть устранены выполняемым переходом. Например, при развертывании плавающей разверткой и свободном протягивании смещение и увод оси отверстия практически не устраняются.

Для размерного анализа рационально разделить минимальный припуск на две части:

$$z_{\min i} = z_{ai} + z_{bi},$$

где $z_{ai} = (Rz + H)_{i-1}$, $z_{bi} = \rho_{i-1} + \varepsilon_i$. Значение z_{ai} всегда является компонентом минимального припуска, включаемого в размерную цепь. Компонент ρ_{i-1} включается в минимальный припуск только как искривление оси или ее непараллельность (неперпендикулярность) относительно базы (рис. 3.86). В зависимости от схемы установки пространственное отклонение определяется так:

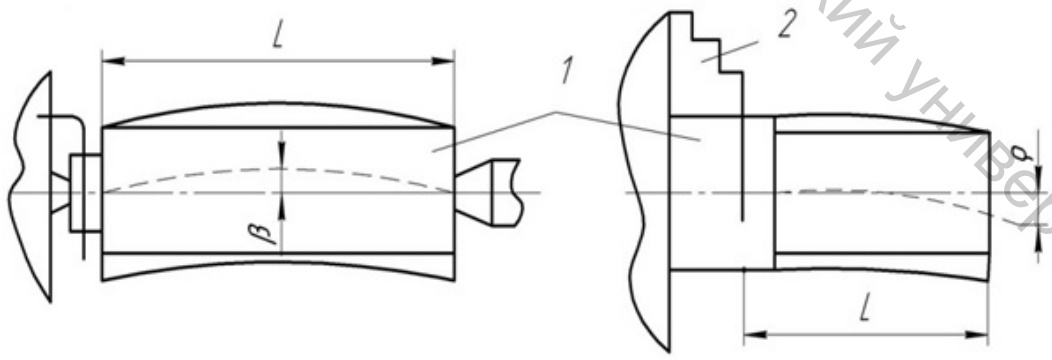
– для установки в центрах

$$\rho = \Delta_{кр} L,$$

– для установки в патроне

$$\rho = 2\Delta_{кр} L,$$

где $\Delta_{кр}$ – местная кривизна, мкм/мм; L – длина заготовки или ее обрабатываемого конца, выступающего из приспособления. Значение $\Delta_{кр}$ приводится в таблицах в зависимости от габаритных размеров заготовки, метода ее получения и вида механической обработки.



а б

Рисунок 3.86 – Схемы влияния кривизны заготовки на минимальный припуск

Витебский государственный технологический университет

Другие виды пространственных отклонений, в том числе смещения осей ρ_{oc} (рис. 3.87), в минимальный припуск при размерном анализе не включаются, т.к. являются самостоятельными звеньями размерной цепи. Аналогичная ситуация возникает и с погрешностью установки ε_i, так как все ее элементы входят в допуск на технологический размер.

Согласно схеме (рис. 3.87) на этом рисунке:

$$C_{\mathbf{0}} = C_{\mathbf{1}} + z_a + \rho_{oc}.$$

Но ρ_{oc} при размерном анализе является самостоятельным звеном размерной цепи, поэтому следует принимать $z_{\mathbf{min}} = z_a$. Аналогичная ситуация возникает и с погрешностью установки ε_i, так как все ее элементы входят в допуск, кроме погрешности схемы установки, которая также выявляется при решении размерной цепи.

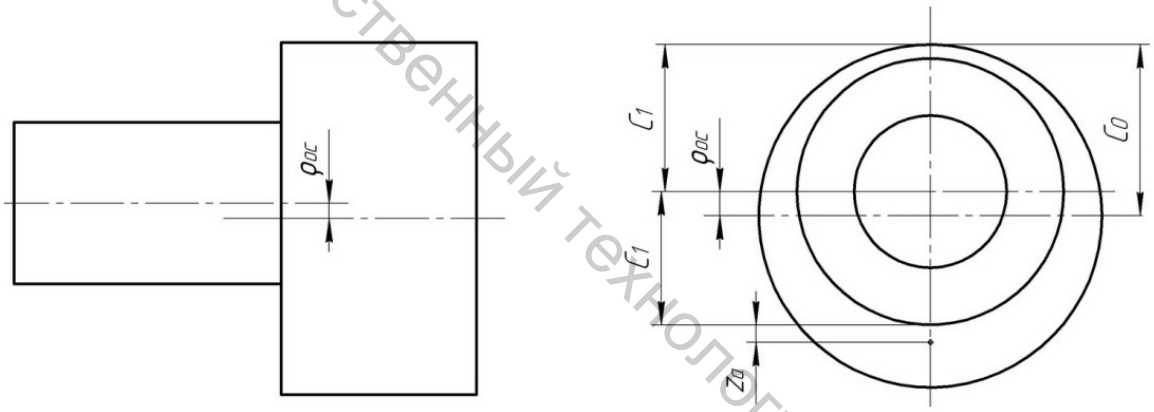


Рисунок 3.87 – Схема определения припуска при смещении осей

Таблицы с расчетными параметрами для определения величин минимальных припусков для наиболее распространенных методов обработки подробно отражены в [24–27] (приложение Е).

Допуски на технологические размеры определяются по таблицам статистической точности [24–27] (приложение Ж). Таблицы для определения экономической точности составлены на основании сбора статистических данных в производственных условиях. При их составлении анализировались данные только тех операций, при выполнении которых погрешность схемы установки равна нулю, а погрешностями формы и взаимного расположения технологической и измерительной баз можно было пренебречь. Таким образом, ωC_i учитывает те компоненты, источниками которых являются: геометрические погрешности (станка, инструмента и приспособления); кинематические погрешности станка;

Витебский государственный технологический университет

копирование погрешности заготовки; износ инструмента; тепловые деформации технологической системы и деформации, связанные с закреплением заготовки.

При обработке на настроенных станках с автоматическим получением размера за счет неизменной (между коррекциями) размерной настройки технологические размеры должны проставляться от технологических баз (рис. 3.88).

В таких случаях допуск на технологический размер определяется выражением:

$$TC_i \geq \omega C_i + \rho_{т.б},$$

где $\rho_{т.б}$ – погрешность формы и относительного расположения технологической базы (пространственные отклонения).

Пространственные отклонения технологической базы принимаются во внимание в тех случаях, когда технологическая база является исходной или предварительно (грубо) обработанной поверхностью. В зависимости от уровня геометрической точности пространственные отклонения составляют следующую часть допуска на линейный размер:

Относительная геометрическая точность	Нормальная (А)	Повышенная (В)	Высокая (С)
Пространственные отклонения, % от допуска на размер	60	40	25

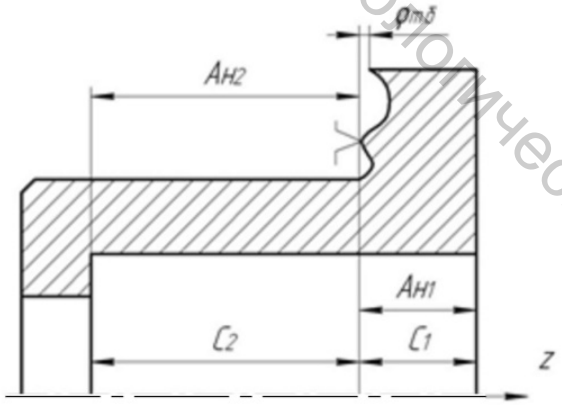


Рисунок 3.88 – Схема размерной настройки (C_i и A_i – соответственно технологические и настроечные размеры)

Если заготовка устанавливается по отверстию на цилиндрический палец (рис. 3.89), то возникает погрешность установки (см. далее). В таких случаях

$$TC_i = \omega C_i + \Delta_{с.у}(A_n).$$

Витебский государственный технологический университет

Аналогично следует поступать в случаях, когда схема базирования реализуется с помощью призмы (рис. 3.90).

Когда деталь обрабатывается блоком инструментов (рис. 3.91), то только один из них, базовый (предположим, *1*), настраивается относительно технологической базы (т.е. соответствующего установочного элемента приспособления). Остальные настраиваются относительно базового инструмента *1*. Поэтому:

$$TC_1 = \omega C_1; \quad TC_2 = \omega A_{н2}; \quad TC_3 = \sqrt{(\omega A_{н3})^2 + (\omega A_{н4})^2}\ .$$

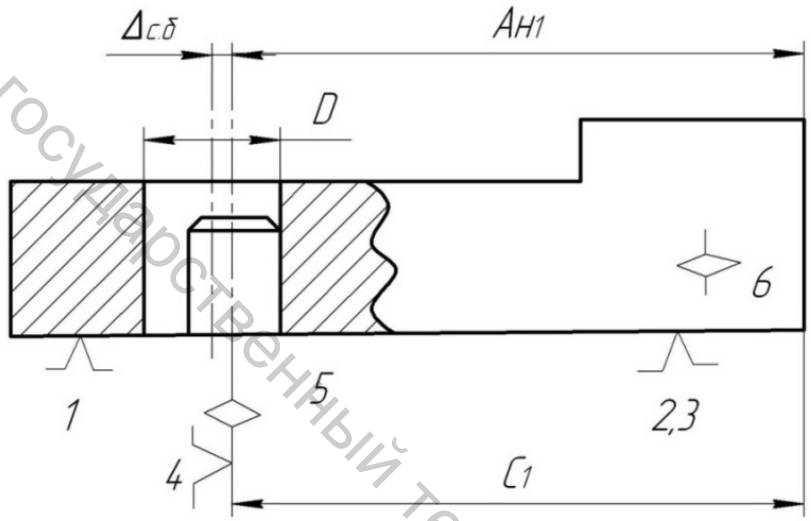


Рисунок 3.89 – Схема установки на палец (с погрешностью)

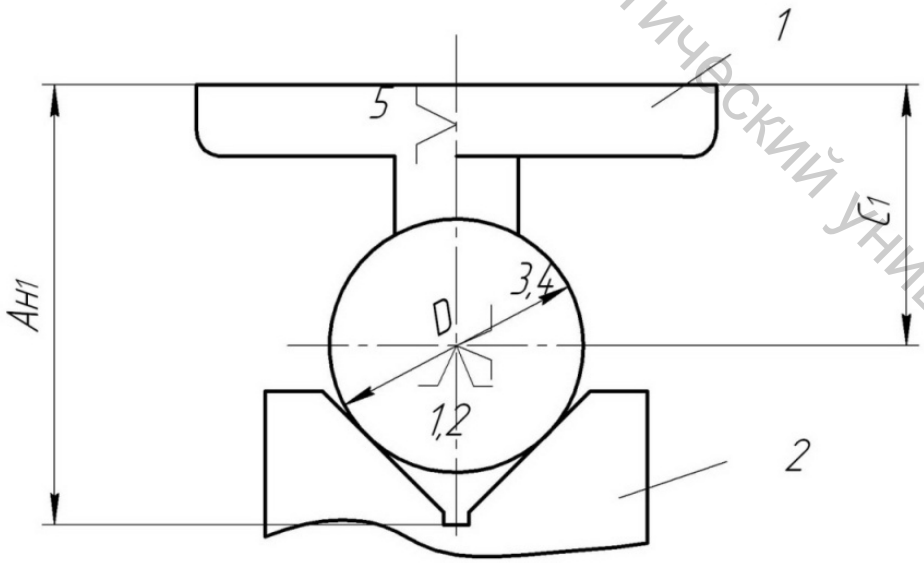


Рисунок 3.90 – Схема установки на призму (с погрешностью)

Витебский государственный технологический университет

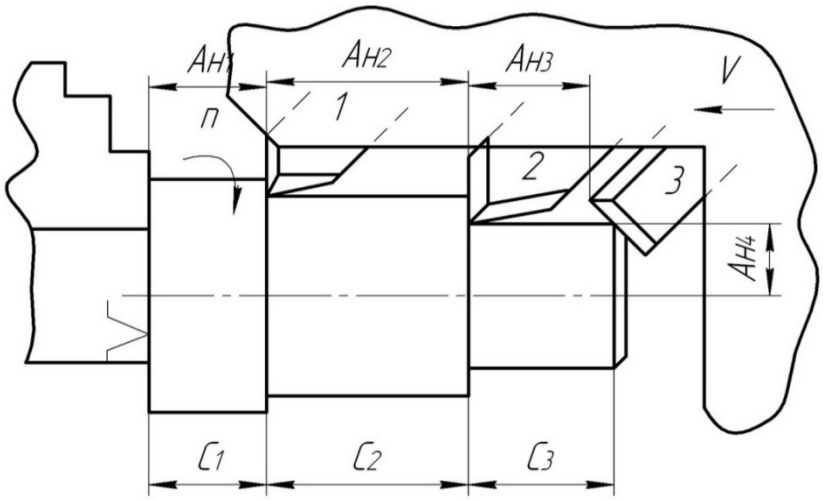


Рисунок 3.91 – Схема размерной настройки блока инструментов
(C_i и $A_{нi}$ – технологические и настроечные размеры)

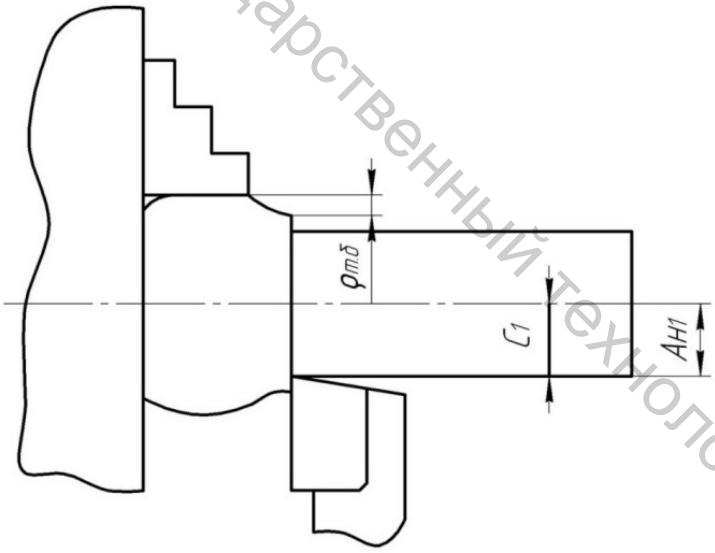


Рисунок 3.92 – Схема размерной настройки при обработке поверхности вращения

При обработке поверхности вращения размерная настройка осуществляется относительно ее оси (рис. 3.92). В таких случаях пространственные отклонения технологической базы (реальной) влияют на точность размера только через копирование погрешности заготовки, что учитывается в значении ωC_i. Поэтому

$$TC_1 = \omega C_1.$$

3.6.2 Формирование размерных схем технологического процесса

Размерная схема представляет собой технологический документ, в котором графически отражено изменение состояния заготовки на каждой операции ее обработки. Она должна строиться для всех трех осей (проекций), а при необходимости – и для отдельных сечений. Для одного из предполагаемых маршрутов обработки рассматриваемой детали на

Витебский государственный технологический университет

рисунке 3.93 приведена размерная схема технологического процесса обработки заготовки по оси X.

На размерной схеме отражены все поверхности, образующиеся в процессе обработки от заготовки до готовой детали. Так, поверхность 10° (*4*) в детали возникает после трехкратной обработки основания с удалением припусков Z_1, Z_2 и Z_3, что ведет к исчезновению поверхностей $10^{З}$, $10^{П}$, $10^{Ч}$ (*1*, *2*, *3*). Аналогично возникает поверхность 4° (*9*) отверстия. Однако при каждой обработке вследствие неизбежного смещения возникает новая ось. В данном случае оси также считаются условными поверхностями. Ось $o4^{З}$ (*16*) отверстия заготовки после удаления припуска Z_6 исчезает, и возникает ось $o4^{П}$ (*15*) промежуточного состояния отверстия $o4^{O}$ (*9*). Все поверхности объекта обработки нумеруются в том порядке, в котором они расположены на схеме детали (в данном случае номерами *1…38).*

Технологические размеры на размерной схеме являются векторными величинами и откладываются от соответствующих технологических и настроечных баз (обозначены кружочками). Обозначение технологических размеров должно быть аналогичным обозначению технологических размеров, указанных в таблице маршрута обработки (таблица 3.10). Если внутри этапа на одной операции с поверхности снимается несколько припусков, то идентичные по обозначению выдерживаемые размеры нумеруются индексами *1* и *2* (размер *К8* на рисунке 3.93).

Размеры заготовки ($З_i$) и детали (F_i), припуски (z_i) и смещения (p_i) осей считаются симметричными величинами и откладываются без выбора одного из направлений.

Размерная схема позволяет выделять технологические размерные цепи, где замыкающими звеньями будут размеры детали F_i, припуски z_i и смещения p_i. В одну размерную цепь может входить только одно замыкающее звено.

3.6.3 Построение исходного и производного графов, формирование уравнений размерных цепей

Выделение размерных цепей с помощью размерной схемы – относительно несложная задача, если в них имеются два или три звена. Но для более длинных цепей задача существенно усложняется. С этой точки зрения более подходящим методом будет выделение размерных цепей с помощью графов технологического процесса.

На рисунке 3.94 представлены исходный и производный графы размерных связей технологического процесса изготовления рассматриваемой детали по оси *X*. Исходный граф связывает поверхности замы-

Витебский государственный технологический университет

кающими звеньями, а производный граф – технологическими размерами.

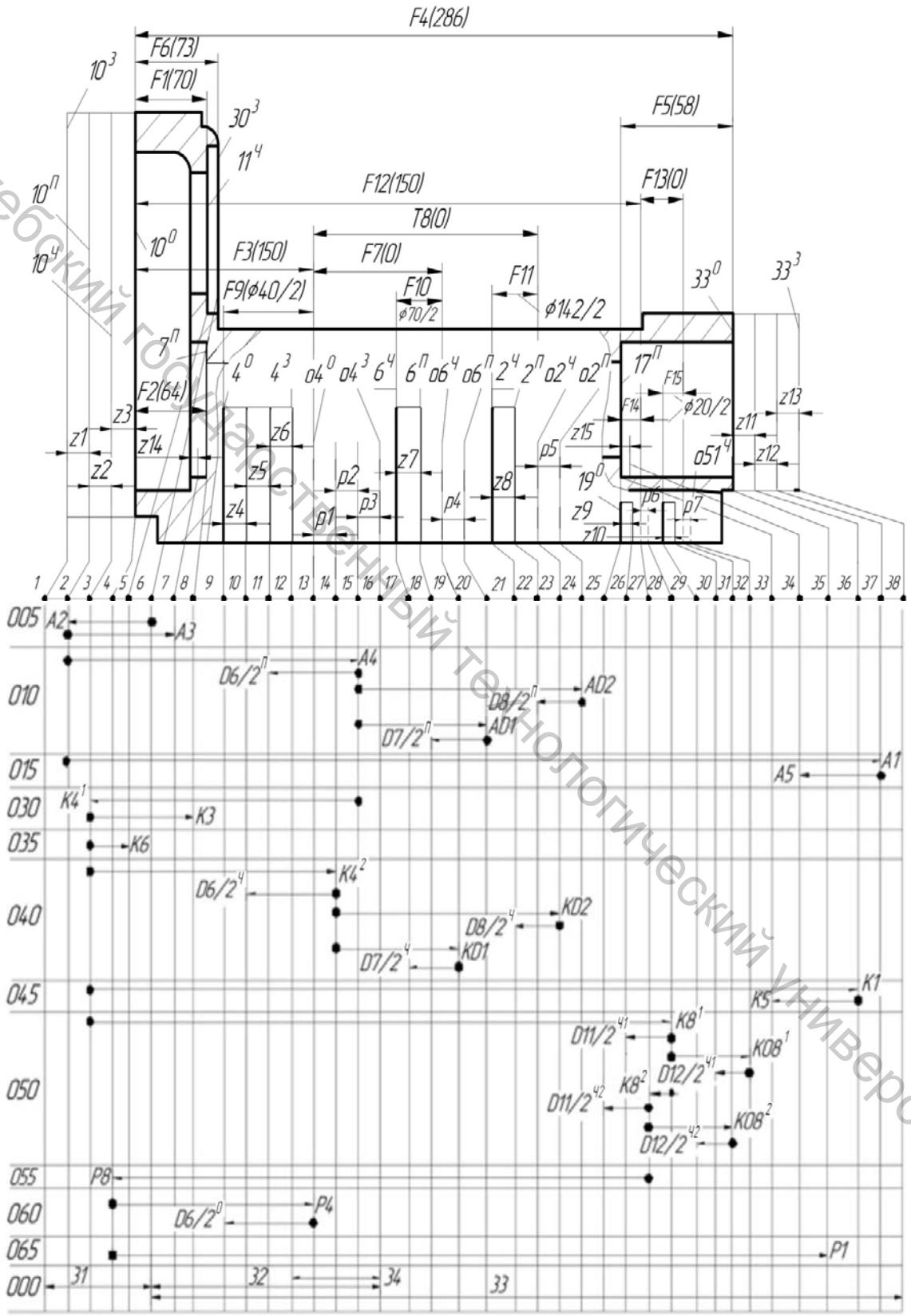
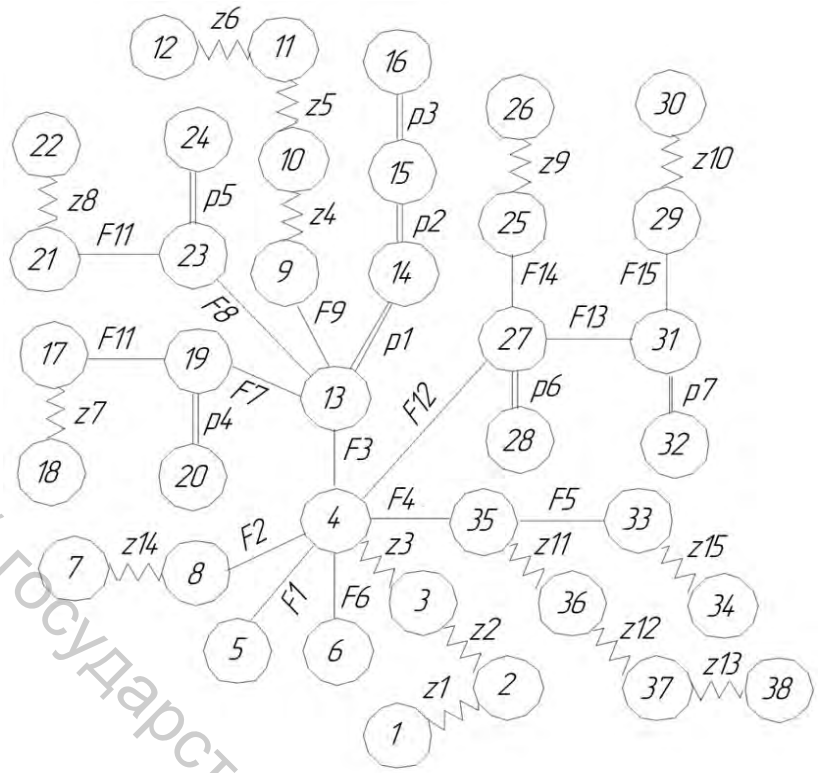
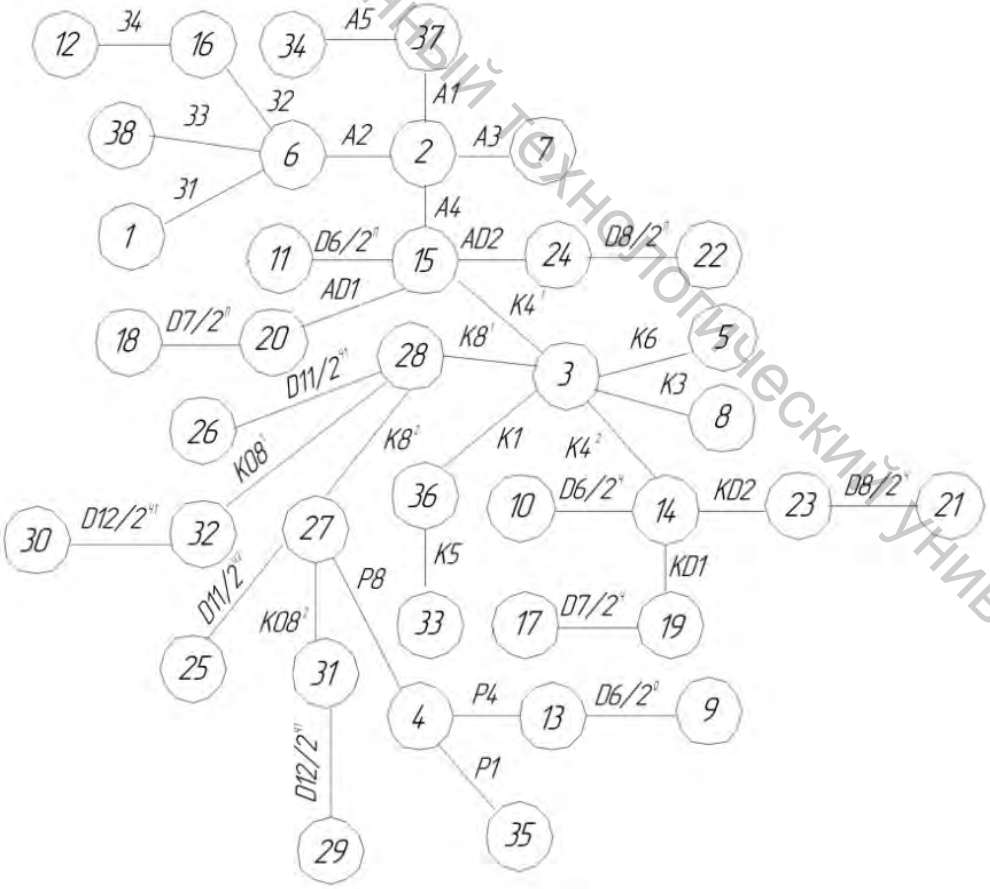


Рисунок 3.93 – Размерная схема технологического процесса по оси X

Витебский государственный технологический университет



а



б

Рисунок 3.94 – Графы технологического процесса изготовления детали:
а – исходный, б – производный

Витебский государственный технологический университет

Замкнутые контуры (размерные цепи) посредством производного графа выделяются следующим образом. На данном графе отмечаются номера поверхностей, связанных замыкающим звеном, после чего легко находится кратчайший путь, соединяющий на графе отмеченные поверхности. Например, если замыкающее звено *z14* связывает поверхности *7* и *8,* то кратчайшим путем, соединяющим их на производном графе, является цепочка из звеньев $A3–A4–K4^1–K3$. Кратчайший путь всегда будет единственно возможным. Он позволяет записать уравнение размерной цепи без ее построения по следующим правилам:

– в левой части уравнения записывается замыкающее звено со знаком «+»;

– обход размерной цепи начинается с той из поверхностей, связанных замыкающим звеном, у которой меньший номер, в направлении отхода от замыкающего звена;

– по мере обхода в правой части уравнения составляющие звенья записываются со знаком «+», если переход через данное звено идет от поверхности с меньшим номером к поверхности с большим номером, и со знаком «–», если переход идет от поверхности с большим номером к поверхности с меньшим номером. Для звена уравнение размерной цепи будет иметь вид $Z14= –A3+A4–K4^1+K3$.

Для рассматриваемого примера получаются следующие уравнения размерных цепей:

$F4= P1$
$F12= P8$
$F3= P4$
$F11= D8/2^{Ч}$
$p6= K8^2$
$F10=D7/2^{Ч}$
$F9= D6/2^{О}$
$F14= D11/2^{Ч2}$
$F15= D12/2^{Ч2}$
$F13= K08^2$
$z1= 31–A2$
$z2= A4–K4^1$
$p2= –K4^2+K4^1$
$z3=K8^1– K8^2–P8$
$p3= –A4+A2+32$
$p7= –K08^2+K8^2+K08^1$
$z13= –A1+A2+33$
$z9= D11/2^{Ч2}+K8^2– D11/2^{Ч1}$

$F1=P8+K8^2–K8^1+K6$
$F2= P8+K8^2–K8^1+K3$
$z12= –K1+K4^1–A4+A1$
$p5= –K02–K4^2+K4^1+A02$
$p4= –K01–K4^2+K4^1+A01$
$z11= –P1+P8+K8^2–K8^1+K1$
$p1= –P4+P8+K8^2–K8^1+K4^2$
$z6= D6/2^{П}–A4+A2+32–34$
$z5=D6/2^{Ч}–K4^2+K4^1–A4–D6/2^{П}$
$z10= D12/2^{Ч2}–K08^2+K8^2+K08^1–D12/2^{Ч1}$
$F8= –P4+P8+K8^2–K8^1+K4^2+K02$
$F7= –P4+P8+K8^2–K8^1+K4^2+K01$
$F5= K5–K1+K8^1–K8^2–P8+P1$
$F6= P8+K8^2–K8^1+K4^1–A4+A2$
$z8= D8/2^{Ч}–K02–K4^2+K4^1+A02–D8/2^{П}$
$z15= K5–K1+K4^1–A4+A1–A5$
$z7= D7/2^{Ч}–K01–K4^2+K4^1+A01–D7/2^{П}$
$z4= D6/2^{О}–P4+P8+K8^2–K8^1+K4^2–D6/2^{Ч}$

Витебский государственный технологический университет

3.6.4 Расчет технологических размеров и размеров заготовки

Расчет технологических размеров и размеров заготовки осуществляется в два этапа.

Этап 1. Проверочный.

Определяется запас по допуску $T(F_i)$, для чего вычисляется поле рассеяния замыкающего звена F_i:

$$\omega F_i = \sqrt{\sum \lambda^2 (T(C_i))^2 + (T(З_i))^2},$$

где $T(C_i)$ $T(З_i)$ – допуски технологических размеров и размеров заготовки, λ – коэффициент относительного рассеяния, учитывающий закон распределения размера (в учебных целях допускается принимать усредненное значение 1,44).

Технологический процесс спроектирован правильно, если соблюдается неравенство

$$T(F_i) > \omega F_i,$$

т.е. имеется некоторый запас $\Delta\omega_i > 0$ по допуску на чертежный размер, определяемый выражением

$$\Delta\omega_i = T(F_i) - \omega F_i.$$

Дефицит по точности замыкающего звена (т.е. $\Delta\omega_i < 0$) является признаком неизбежности выхода части деталей в брак. В таком случае необходимо выбранные ранее допуски технологических размеров $T(C_i)$ уменьшить, предусмотрев для этого повышение точности отдельных операций за счет смены оборудования, применения более совершенных приспособлений, инструмента и средств активного контроля. Если это по каким-либо причинам невозможно, то необходима корректировка технологического процесса, которая заключается: 1) в выборе других баз и иной, по сравнению с имеющейся, простановкой размеров на операциях, что может обеспечить укорочение размерной цепи; 2) во введении промежуточного перехода (или переходов), который позволит повысить точность каких-либо составляющих звеньев.

Этап 2. Расчетный.

Расчет технологических размерных цепей осуществляется по

Витебский государственный технологический университет

средним значениям вероятностным методом.

Для чего рассчитываются средние значения припусков по формуле.

$$z_{cpi} = z_{\min i} + \frac{\sqrt{\lambda^2{}_i \sum (T(C_i))^2 + \sum (T(З_i))^2}}{2}.$$

Средние значения чертежных размеров определяются по формулам:

$F_{cpi} = F_i + \frac{T(F_i)}{2}$ – для охватываемого размера (отверстия),

$F_{cpi} = F_i - \frac{T(F_i)}{2}$ – для охватывающего размера (вала),

$F_{cpi} = F_i$ – для прочих размеров.

Решение системы полученных уравнений размерных цепей осуществляется (после определения средних значений замыкающих звеньев) любым известным методом (метод Гаусса, с помощью определителей и т.д.)).

При расчетах округление получаемых значений осуществляется до четвертого знака после запятой. После решения системы необходимо рассчитать номинальные значения размеров заготовки и технологических размеров. После чего необходимо округлить полученные значения технологических размеров и размеров заготовки в соответствии с порядком допуска на соответствующий размер.

3.7 Жесткость машин и технологических систем механической обработки

В процессе эксплуатации на любую машину действуют силы, которые вызывают упругие деформации как машины в целом, так и ее элементов [2–5]. Различают деформации самих деталей, из которых состоит машина, и контактные деформации на поверхностях сопряжения деталей. Деформации деталей не являются доминирующими, они только дополняют контактные, составляющие основную долю (до 85 %) в общих перемещениях. Сближение контактирующих поверхностей зависит не только от приложенной силы, но и от реальной площади контакта, которая определяется погрешностью формы и микрогеометрией этих поверхностей, а также приложенной силой. Технологическая система механической обработки отличается от обычной системы тем, что в нее,

Витебский государственный технологический университет

кроме технологической машины (станка), включены приспособление, инструмент и заготовка. В такой системе технолога интересует не полная упругая деформация, а только та ее часть, которая влияет на размер обрабатываемой поверхности, смещая уровень размерной настройки.

Свойство машины (и технологической системы) упруго деформироваться под действием силы будем называть *податливостью,* а обратное податливости свойство – *жесткостью.* Податливость измеряется в миллиметрах на килоньютон (мм/кН), а жесткость *j* – в килоньютонах на миллиметр (кН/мм). Связь между силой *P* и соответствующей ей упругой деформацией δ обычно нелинейна (рис. 3.95), поэтому определяющее уравнение жесткости всякой машины имеет вид

$$j = \frac{\Delta P}{\Delta \delta},$$

где ΔP – приращение деформирующей силы; $\Delta\delta$ – соответствующее ему приращение упругой деформации.

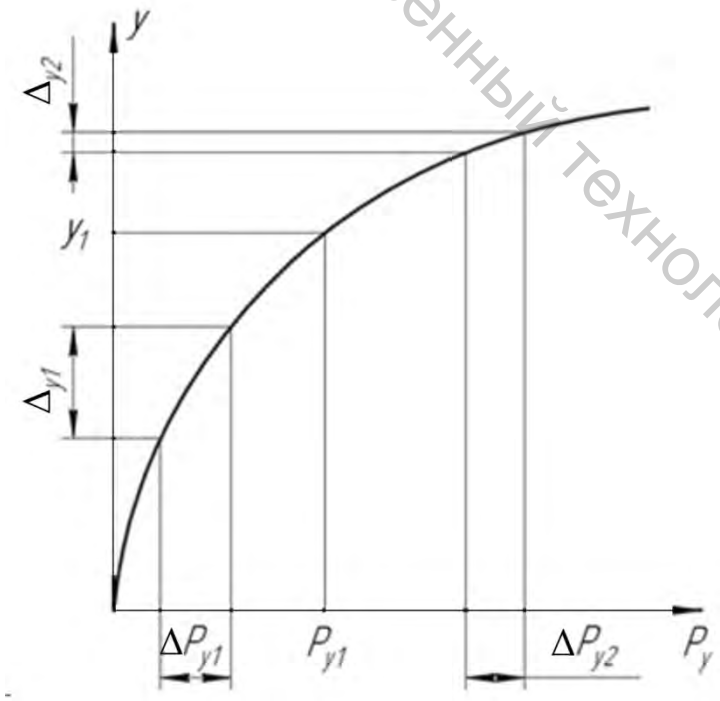


Рисунок 3.95 – Зависимость проекции *y* упругой деформации *δ* технологической системы от проекции силы резания

Для технологической системы механической обработки определяющее уравнение жесткости записывается следующим образом:

$$j = \frac{\Delta P_y}{\Delta y},$$

где ΔP_y – приращение проекции силы резания на ось Y, перпендикулярную к обработанной поверхности; Δy – соответствующее ему приращение проекции упругой деформации на ту же ось.

В качестве приближенной характеристики технологической системы используют среднюю жесткость *j* для диапазона изменения силы P_y от нуля до некоторого фиксированного значения P_{y1}. Тогда

Витебский государственный технологический университет

$$j = \frac{P_{y1}}{y_1}.$$

Жесткость технологической системы существенно зависит от ее состояния и условий нагружения. Так, средняя жесткость шпиндельной бабки круглошлифовального станка после 30-минутного разогрева на холостом ходу увеличивается на 44 %. Эксперименты показали, что средняя жесткость существенно зависит от координат точки приложения и направления действия силы резания. Например, на рисунке 3.96 показана зависимость жесткости j токарного станка от отношения P_y/P_z. Объясняется это явление тем, что на упругую деформацию суппорта влияет не только составляющая P_y, но моменты сил P_x и P_z. относительно мгновенных точек поворота в вертикальной и горизонтальной плоскостях. При этом из-за изменения отношения между составляющими силы резания изменяются не только значения указанных моментов, но иногда и их знак.

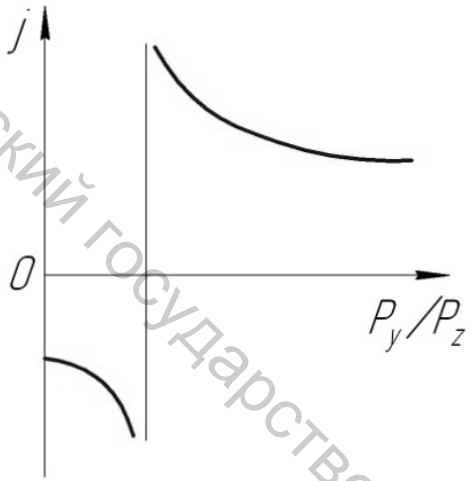


Рисунок 3.96 – Зависимости жесткости токарного станка от отношения проекций силы резания

При точении в центрах (рис. 3.97 а) жесткость зависит от координаты x точки обработки A (рис. 3.97 б). Характер этой зависимости (рис. 3.97 в) обусловливается относительной податливостью заготовки. Если жесткость заготовки очень велика, то жесткость технологической системы при положении точки A между центрами будет большей, чем в зоне передней или задней бабки (показано штриховой линией). Изменение жесткости, показанное сплошной линией, соответствует случаю, когда жесткость заготовки мала по сравнению с жесткостью передней и задней бабок.

Очень часто при обработке сила резания периодически изменяется либо из-за изменения глубины t резания (рис. 3.98), либо вследствие прерывности процесса резания (строгание, долбление, фрезерование) или обрабатываемой поверхности. В первом приближении можно принять, что сила резания изменяется либо гармонически, либо в виде прямоугольных импульсов.

Витебский государственный технологический университет

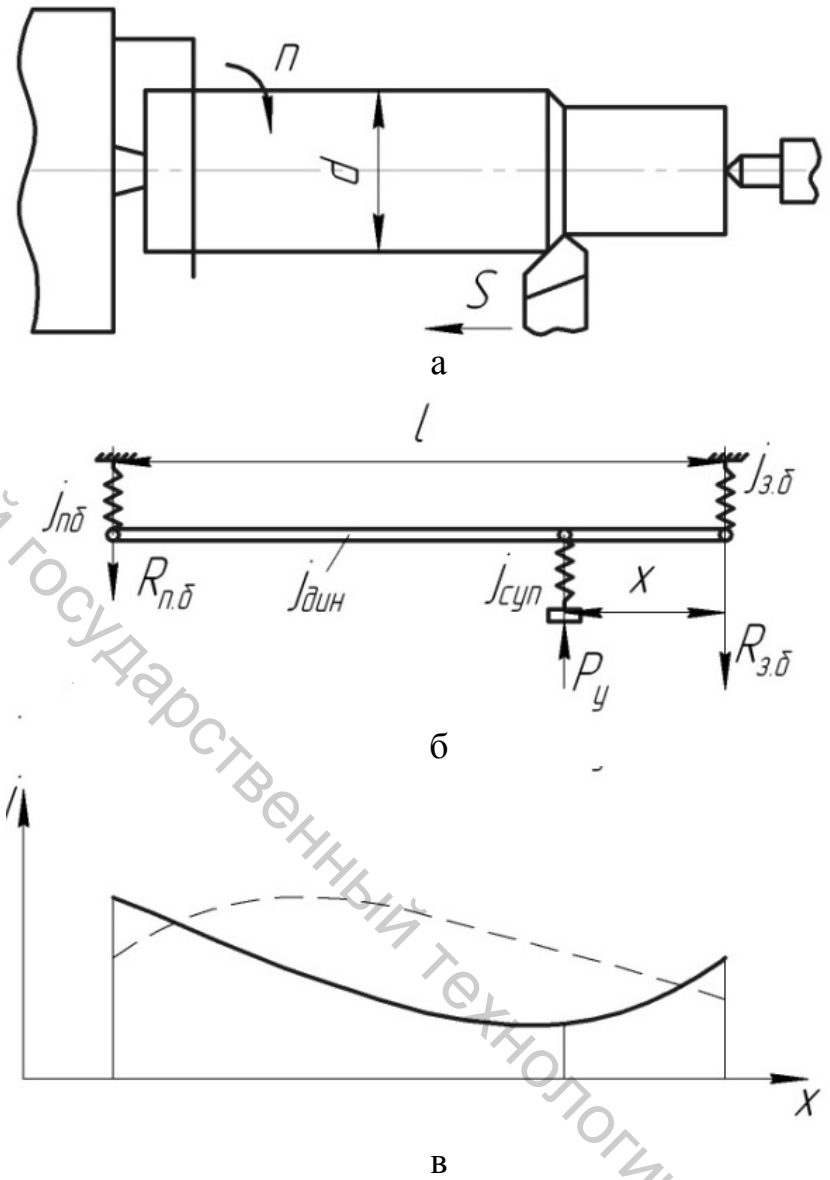


Рисунок 3.97 – Схема изменения жесткости при точении в центрах: $j_{п.б.}$, $j_{суп}$ и $j_{з.б}$ – жесткости соответственно передней бабки, суппорта и задней бабки; $R_{п.б.}$ и $R_{з.б}$ – реакции опор заготовки в передней и задней бабках

Полагая, что в определяющем уравнении $\Delta P_y = A_p$, а $\Delta y = A_{упр}$, где A_p – амплитуда силы P_y, а $A_{упр}$ – амплитуда упругой деформации, можно ввести понятие *«динамическая жесткость»:*

$$j_{дин} = \frac{A_p}{A_{упр}}.$$

Витебский государственный технологический университет

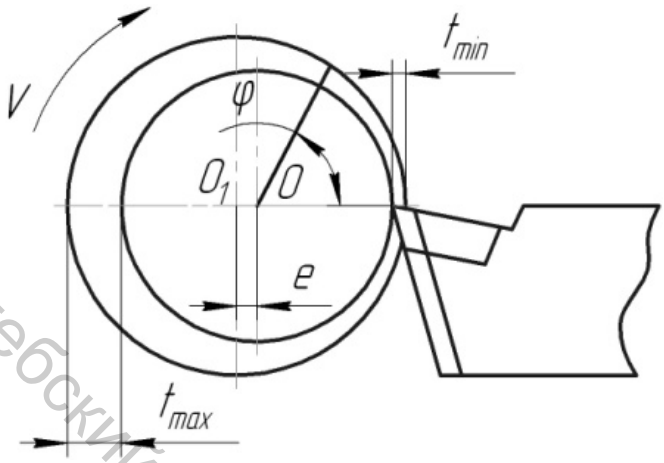


Рисунок 3.98 – Схема изменения глубины резания при точении заготовки, ось вращения О которой не совпадает с ее геометрической осью O_1 (*e* – смещение осей, *φ* – угол поворота)

Динамическая жесткость характеризует поведение технологической системы при ее нагружении периодической силой. Определяющее уравнение можно применять и для случая, когда характер изменения силы резания имеет вид прямоугольных импульсов. Зависимость динамической жесткости от частоты *co* возмущающей силы для системы с одной степенью свободы показана на рисунке 3.99, где линия *1* относится к системе с большим, а линия *2* – к системе с меньшим демпфированием. Минимальная жесткость соответствует совпадению частоты возмущения с собственной частотой колебаний системы $\omega_{обр}$. При $\omega_{обр} \to 0$ динамическая жесткость становится равной *статической жесткости j*.

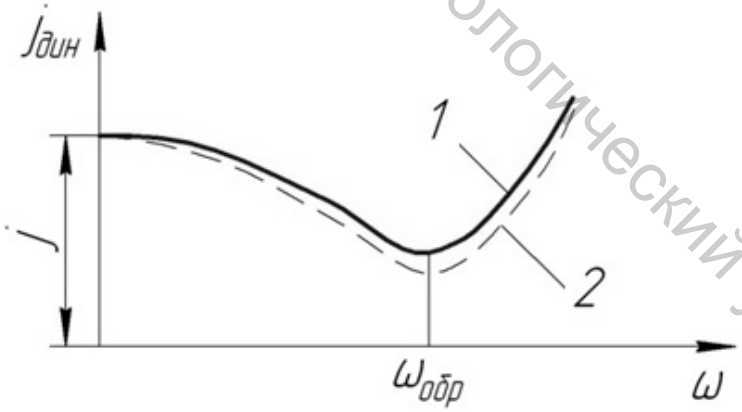


Рисунок 3.99 – Зависимость динамической жесткости системы с одной степенью свободы от частоты возмущающей силы

Динамическая $j_{дин}$ и статическая *j* жесткости связаны коэффициентом динамичности $K_{дин}$:

Витебский государственный технологический университет

$$K_{дин} = \frac{j}{j_{дин}}.$$

Чем больше коэффициент $K_{дин}$, тем больше амплитуда упругой деформации при одинаковой амплитуде силы резания.

Обычно технологическая система имеет несколько степеней свободы и соответственно несколько собственных частот колебаний. Например, случай токарной обработки очень жесткой заготовки в патроне можно привести к системе с двумя степенями свободы. Коэффициент динамичности системы в данном случае определяется по формуле

$$K_{дин} = \frac{K_{дин1} j_2 + K_{дин2} j_1}{j_1 + j_2},$$

где индекс 1 относится к заготовке, а индекс 2 – к патрону. Анализ этого выражения показывает, что для уменьшения коэффициента динамичности технологической системы без изменения ее общей жесткости необходимо увеличить статическую жесткость того элемента, у которого $K_{дин}$ больше, и уменьшать у того, у которого он меньше.

Жесткость технологических систем механической обработки и их элементов регламентируется для оценки их качества. Она обычно определяется экспериментально. Наиболее объективные результаты дают методы определения жесткости, которые в качестве источника деформирующей силы используют процесс резания. Такие методы называют производственными. Некоторые из них основаны на использовании элемента с известной жесткостью.

Производственный метод определения жесткости токарного станка (рис. 3.100) осуществляется в три этапа. На первом этапе за 5...7 проходов без изменения размера настройки $A_н$ обтачивается участок заготовки, после чего можно считать, что $A_н = d_н/2$. На втором этапе без изменения размера настройки обрабатывается оставшаяся часть заготовки. На последнем этапе с помощью индикаторного устройства в нескольких сечениях с разными вылетами L_i измеряются отклонения Δ_i радиуса $d_i/2$ от $A_н$. Причиной этих отклонений является упругая деформация технологической системы, т.е. в любом сечении $\Delta_i = y_i$. Эта деформация складывается из деформации станка $y_{ст}$ и обрабатываемого образца $y_{обр\,i}$, податливость которого, как известно из курса «Сопротивление материалов», пропорциональна вылету обработки L_i в кубе. Для любого сечения можно записать:

Витебский государственный технологический университет

$$y_i = \Delta_i = P_y(p_{ст} + p_{обрi}),$$

где $p_{ст}$ – податливость станка; $p_{обрi}$ – податливость обрабатываемого образца в i-м сечении. Отсюда с учетом известной зависимости податливости образца от его вылета и на основании того, что податливость системы из последовательно соединенных элементов равна сумме податливостей этих элементов, получаем

$$j = \frac{29{,}59D^4}{L_{обр}^3}\frac{1-K_{di}}{K_{di}-\lambda_i^3},$$

где $K_{di} = \dfrac{\Delta_i}{\Delta_{обрi}}$; $\Delta_i = \dfrac{L_i}{L_{обр}}$.

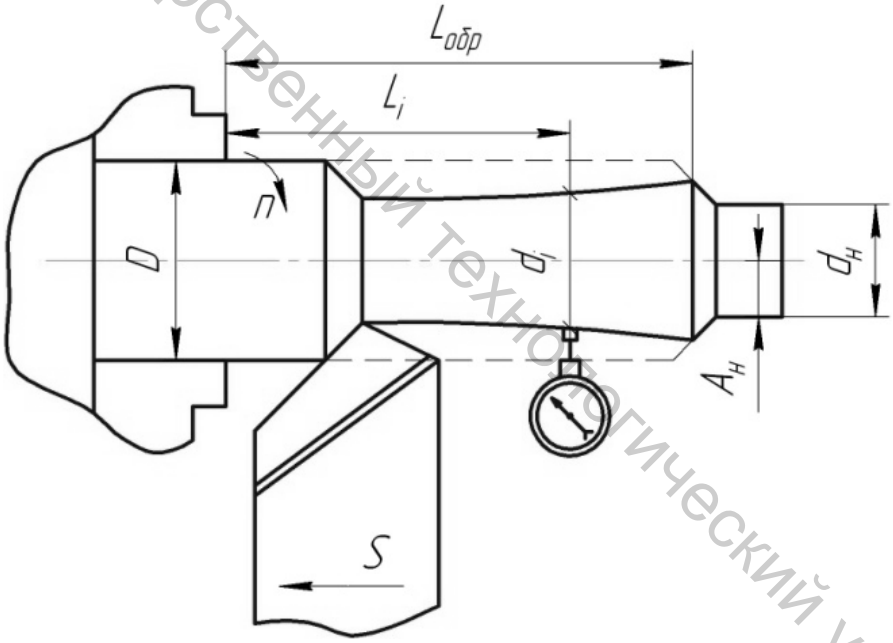


Рисунок 3.100 – Схема производственного метода определения жесткости токарного станка (система «передняя бабка – суппорт»)

Для повышения точности оценки жесткости и компенсации погрешности измерения Δ_i необходимо вычислить $j_{ст}$ для нескольких сечений (значений λ_i) и затем определить среднее значение.

Рассмотренный метод позволяет определять и динамическую жесткость. Для этого образец закрепляют через эксцентричную разрезную втулку с заданным значением эксцентриситета $e_{обр}$. После обтачи-

Витебский государственный технологический университет

вания замеряется эксцентриситет e_i в нескольких сечениях. Полученные данные позволяют вычислять динамическую жесткость.

Для определения жесткости плоскошлифовального станка можно использовать двухопорную балку *1,* на которой закреплены три образца *2...4* (рис. 3.101). На первом этапе путем длительного выхаживания добиваются, чтобы прошлифованные поверхности образцов находились в одной плоскости. Затем, после выполнения вертикальной подачи круга s, осуществляется один проход, во время которого шлифуются только образцы *3* и *4.* При шлифовании образца *4* податливость системы равна податливости станка $p_{ст}$, а при шлифовании образца *3* – сумме податливостей станка и балки *(p_1).* И в данном случае легко получаем выражение для вычисления жесткости станка $j_{ст}$, если известны жесткость балки j_1 и припуски $П_1$ и $П_2$, снятые соответственно с образцов *4* и *3*:

$$j = \frac{j_i s(П_1 - П_2)}{(S - П_1)П_2}.$$

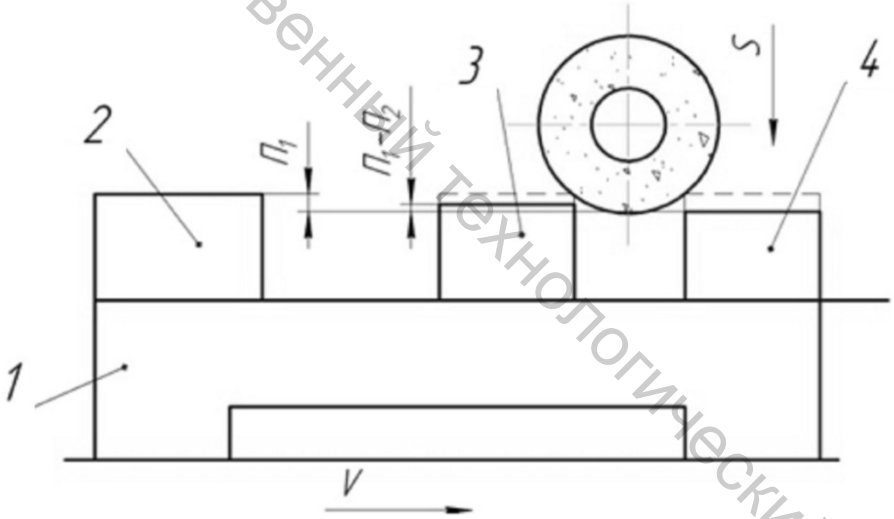


Рисунок 3.101 – Схема производственного метода определения жесткости плоскошлифовального станка

Более точные результаты оценки жесткости получаются, если есть возможность в процессе обработки измерять силу резания и упругую деформацию.

3.8 Погрешности сборки и механической обработки

Погрешности, возникающие при сборке и механической обработке, проявляются как систематические или случайные величины [2–5].

Витебский государственный технологический университет

Источником *систематических погрешностей* является определенная причина или процесс, знание которых позволяет прогнозировать уровень погрешности в любой момент времени протекания технологического процесса. *Случайные погрешности* возникают в результате действия большого количества не связанных между собой факторов. Прогнозировать уровень случайной погрешности для конкретной сборочной единицы или обработанной детали невозможно. Причинная связь между случайной погрешностью и вызывающими ее факторами иногда бывает известной (явной), а иногда – не вполне выясненной.

В зависимости от характера влияния времени τ протекания технологического процесса (или порядкового номера *i* обрабатываемой заготовки) погрешности проявляются как *стационарные* или *нестационарные* (рис. 3.102). Средний уровень и размах стационарной погрешности не зависят от времени, а у нестационарной может изменяться либо средний уровень, как это показано на рисунке 3.102, либо, для случайной погрешности, размах, либо и средний уровень и размах.

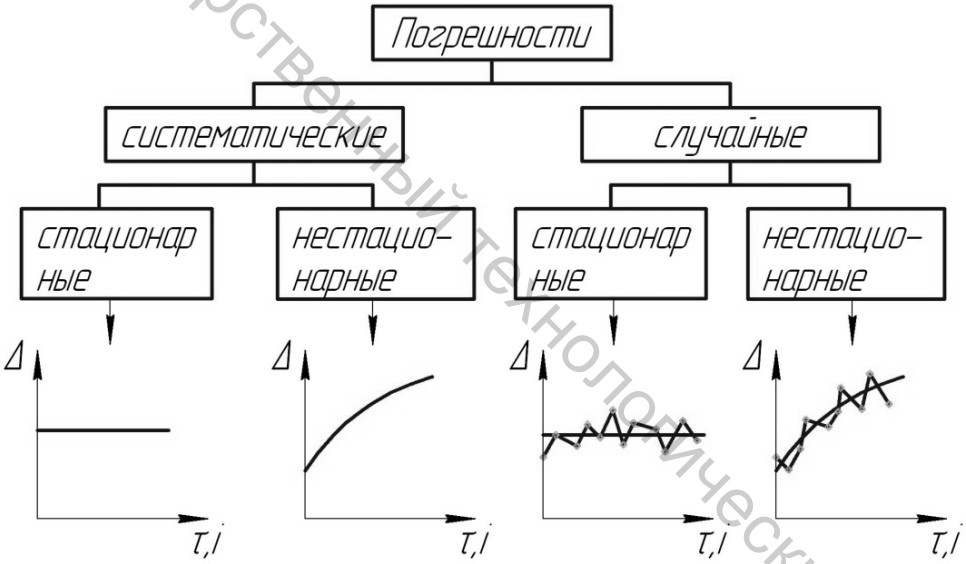


Рисунок 3.102 – Классификация погрешностей по проявлению
(Δ – погрешность, τ – время, *i* – номер заготовки)

Наиболее полно случайная погрешность характеризуется законом распределения (его параметрами). Установлено, что погрешности размеров подчиняются нормальному закону распределения (рис. 3.103 а), который имеет место, когда случайная величина зависит от действия большого числа различных факторов, причем интенсивность влияния всех факторов примерно одинакова. Нормальному закону, кроме размеров деталей, обработанных на настроенных станках, подчиняются и масса заготовок, погрешности измерений, твердость заготовок и т.д.

Параметры нормального закона: математическое ожидание *M(A)* и стандартное отклонение *σ* можно оценить на основании результатов из-

Витебский государственный технологический университет

мерения размера A_i деталей выборки объемом m из партии или потока. Оценкой $M(A)$ является среднее значения $\overline{A}$:

$$\overline{A} = \frac{\sum_{i=1}^{m} A_i}{m},$$

а оценкой стандартного отклонения σ величина S, определяемая из выражения

$$S^2 = \sum_{i=1}^{m} \frac{(A_i - \overline{A})^2}{m-1},$$

где A_i – элементы вариационного ряда размеров A.

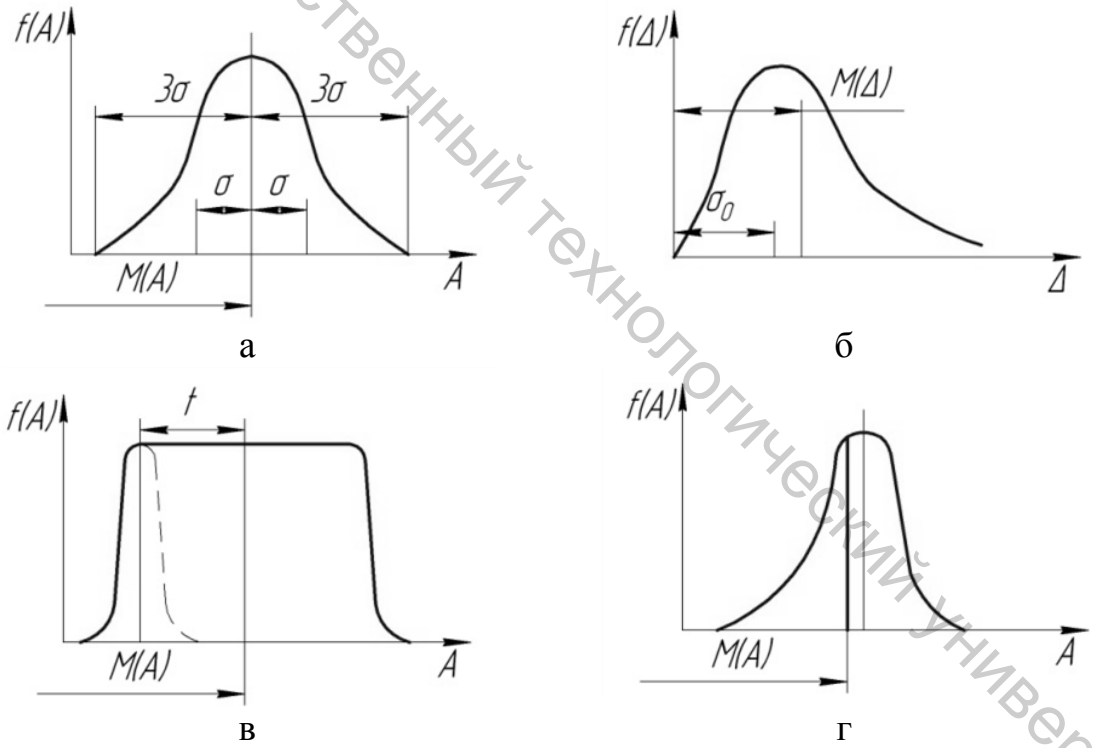


Рисунок 3.103 – Законы распределения погрешностей обработки

Данные оценки являются приближенными вследствие ограниченности объема выборки. Точность оценки характеризуется доверительным интервалом, в котором с заданной доверительной вероятностью (характеристики достоверности оценки) находятся истинные значения оцениваемого параметра. При относительно небольшом объеме выбор-

Витебский государственный технологический университет

ки доверительный интервал для *M(A)* определяется следующим неравенством:

$$\overline{A} - \frac{t(P,m)S}{\sqrt{m}} < M(\overline{A}) < \overline{A} + \frac{t(P,m)S}{\sqrt{m}},$$

где *t(P,m)* – критерий Стьюдента, зависящий от доверительной вероятности *P* и объема выборки *m*.

Значения критерия Стьюдента для *P* = 0,95 приведены в таблице 3.16. Доверительный интервал для стандартного отклонения определяется следующим неравенством (для *m* > 15):

$$S(1-q) < \sigma < S(1+q),$$

где *q* – критерий, зависящий от доверительной вероятности *P* и объема выборки *m* (табл. 3.17).

Если *m* < 15, то оценку *S* лучше осуществлять по размаху $R_m = A_{\max} - A_{\min}$ значений *A* в выборке. Тогда

$$\frac{R_m}{d_{m1}} < \sigma < \frac{R_m}{d_{m2}},$$

где d_{m1}, d_{m2} – критерии, зависящие от доверительной вероятности *P* и объема выборки *m* (табл. 3.18).

Таблица 3.16 – Значения критерия Стьюдента при *P* - 0,95

m, шт.	*t*	*m*, шт.	*t*
5	2,78	18	2,11
8	2,37	20	2,09
10	2,26	25	2,06
12	2,20	30	2,05
15	2,15	40	2,02

Таблица 3.17 – Значения критерия *q* при *P* = 0,95

m, шт.	*q*	*m*, шт.	*q*
15	0,46	30	0,28
17	0,42	35	0,26
20	0,37	40	0,24
25	0,32	45	0,22

Таблица 3.18 – Значения критерия d_m при *P* = 0,95

m, шт.	d_{m1}	d_{m2}	*m*, шт.	d_{m1}	d_{m2}
4	3,98	0,59	10	4,79	1,67
6	4,36	1,06	11	4,86	1,78
8	4,61	1,41	12	4,92	1,88
9	4,70	1,55			

Витебский государственный технологический университет

Погрешности относительного положения и погрешности формы поверхностей подчиняются закону Рэлея (рис. 3.103 б). Эти погрешности являются положительными величинами и изменяются от нуля до определенного значения. Закон Рэлея однопараметрический. Стандартное отклонение погрешности $\Delta_{(\sigma)}$ связано с параметром закона распределения σ_0 зависимостью $\sigma=0,655\sigma_0$, а математическое ожидание погрешности Δ – выражением $M(\Delta)=1,253\sigma_0$.

Для распределения Рэлея экспериментальная оценка математического ожидания и стандартного отклонения вычисляется так же, как для нормального распределения.

Если на выполняемый размер, кроме случайных причин, обусловливающих рассеяние его значений согласно нормальному распределению, действует систематическая причина, обусловливающая равномерное смещение l центра группирования размеров, то при $l/\sigma > 25$ (рис. 3.103 в) распределение этого размера будет близко к закону равной вероятности.

Если систематическая причина обусловливает неравномерное смещение центра группирования размеров, то выполняемый размер будет подчиняться несимметричному закону распределения (рис. 3.103 г), который называется обобщенным *А*-законом.

Поле рассеяния размеров (погрешностей) при известных параметрах закона распределения можно определить из следующих выражений: $\omega = 6\sigma$ (закон нормального распределения); $\omega = 5,25\sigma$ (закон Рэлея); $\omega = 3,464\sigma$ (закон равной вероятности). Данные значения соответствуют доверительной вероятности $P = 0,997$.

Источниками сборочных погрешностей являются: погрешности деталей, из которых собирается машина или сборочная единица; силовое замыкание, необходимое для сохранения определенности базирования.

Силовое замыкание вызывает не только полезные, преднамеренно создаваемые упругие деформации деталей, но и вредные, которые искажают форму, полученную деталью после механической обработки. Последние возникают из-за неравномерного распределения внутренних напряжений в деформируемой детали, вызываемых силовым замыканием. Это возможно либо из-за неравномерного распределения точек приложения замыкающих сил, заложенного в конструкции сборочной единицы, либо из-за погрешностей деталей сборочной единицы. Например, при сборке на валу ряда деталей с непараллельными торцами его ось искривляется.

При сборке машин и сборочных единиц нормальной точности вредные деформации составляют небольшую часть допуска на их параметры качества и поэтому считаются несущественными. При сборке же высокоточных (1...4-я степени точности) изделий эти деформации могут

Витебский государственный технологический университет

не только быть соизмеримыми с допуском, но и существенно превосходить его.

Погрешности механической обработки зависят от множества различных факторов. Их классификация приведена на рисунке 3.104. Для погрешностей, не зависящих от режима резания, предусмотрены два уровня классификации, а для других достаточно одного. Более подробно причины формирования погрешностей механической обработки рассмотрены ниже.

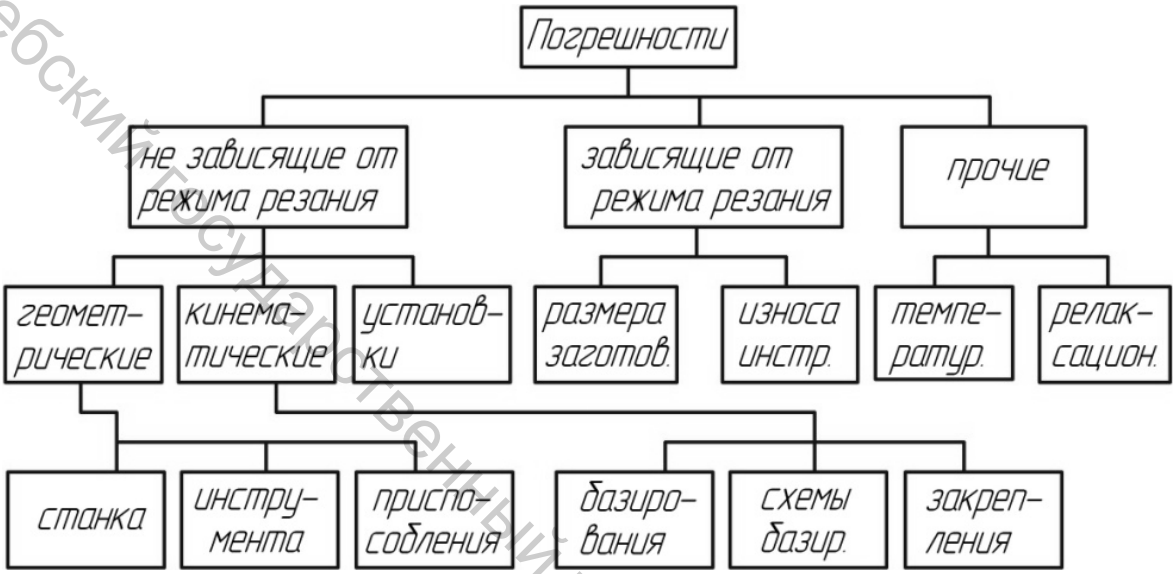


Рисунок 3.104 – Классификация причин возникновения погрешностей

3.9 Погрешности, не зависящие от режима резания

Геометрические, кинематические погрешности и погрешности установки (см. рис. 3.104) не зависят от режима резания. К *геометрическим погрешностям* станка относятся погрешности расстояний и относительных поворотов исполнительных элементов станка, биение шпинделя и погрешности формы направляющих элементов станка. Некоторые из перечисленных погрешностей переносятся на обрабатываемую заготовку (наследуются ею) и проявляются как систематическая стационарная погрешность. Например, погрешности замыкающих звеньев A_Δ и α_Δ агрегатного станка (см. рис. 3.105) полностью переносятся на обрабатываемую заготовку. В других случаях геометрические погрешности станка при переносе на деталь трансформируются. Так, неперпендикулярность оси шпинделя вертикально-фрезерного станка к направлению подачи (рис. 3.105) ведет к появлению погрешности формы Δ (неплоскостности) обработанной поверхности, поскольку ее обра-

Витебский государственный технологический университет

зующей становится отрезок эллипса. Радиус кривизны обработанной поверхности можно найти по формуле $R = D/(2\alpha)$ (здесь α – угол наклона оси фрезы в радианах), а отклонение Δ от плоскости – по формуле $\Delta = \alpha B^2 / 4D$.

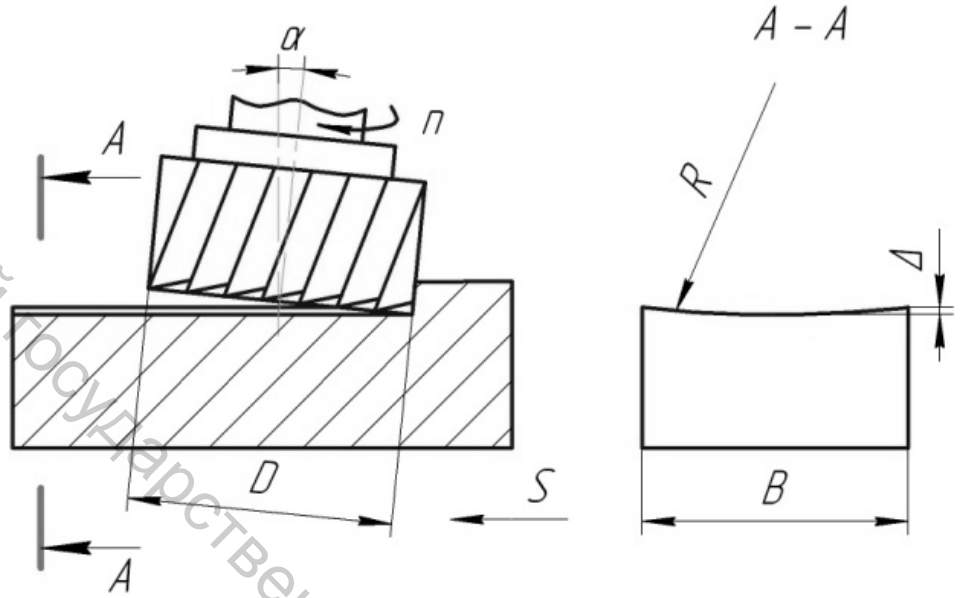


Рисунок 3.105 – Схема формирования отклонения от плоскостности при торцовом фрезеровании

Смещение оси центра задней бабки по отношению к оси шпинделя токарного станка в горизонтальной плоскости приводит к появлению конусности (рис. 3.106 а), а в вертикальной плоскости придает обработанной поверхности вид гиперболоида вращения (рис. 3.106 б). В первом случае максимальное отклонение от цилиндричности $\Delta_{цил} = 2\Delta_{гор}$, а во втором $\Delta_{цил} \approx \Delta^2_{верт} / d$ (здесь d – номинальный диаметр обработанной поверхности), т.е. во много раз меньше, чем в первом.

Погрешности изготовления инструмента переносятся на обработанную деталь только в тех случаях, когда формообразование осуществляется методами копирования размера и (или) формы инструмента, а также методами огибания. И в данном случае погрешности могут переноситься непосредственно (погрешность диаметра развертки, погрешность формы режущей кромки фасонного инструмента и т.д.) или опосредованно с трансформацией. Например, погрешность заточки сверла (неодинаковость углов в плане для режущих кромок или их торцовое биение) приводит к разбивке просверленного отверстия и уводу его оси.

Сверление отверстий по кондукторным втулкам обеспечивает не только повышение точности положения его оси (начальное смещение уменьшается), но и уменьшение разбивки отверстия примерно на 50 %.

Витебский государственный технологический университет

То же можно сказать и о влиянии погрешности заточки зенкеров. Разбивка отверстий в данном случае увеличивается с увеличением скорости резания, подачи, глубины резания и твердости обрабатываемого материала и уменьшается с увеличением главного угла в плане, заднего угла и жесткости технологической системы. Применение кондукторных втулок повышает точность диаметра зенкеруемых отверстий.

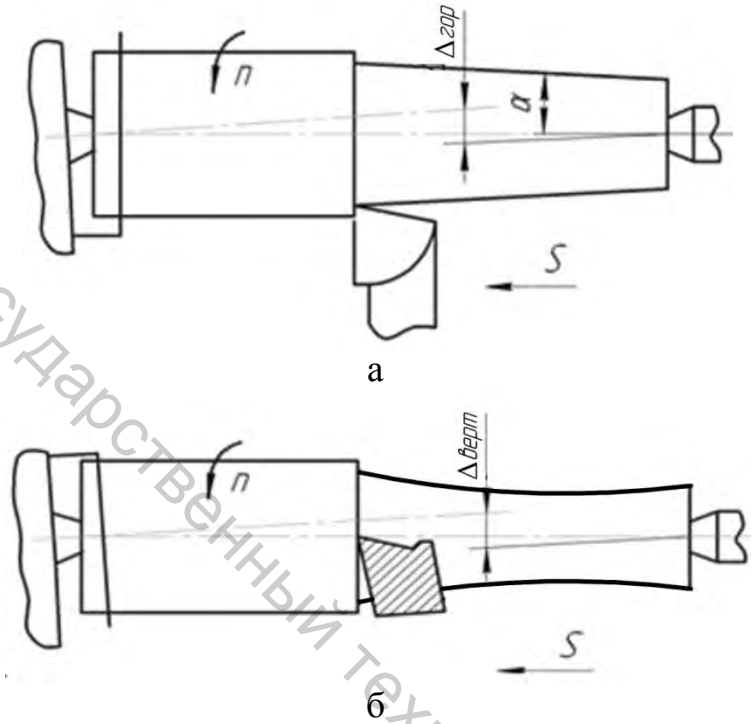
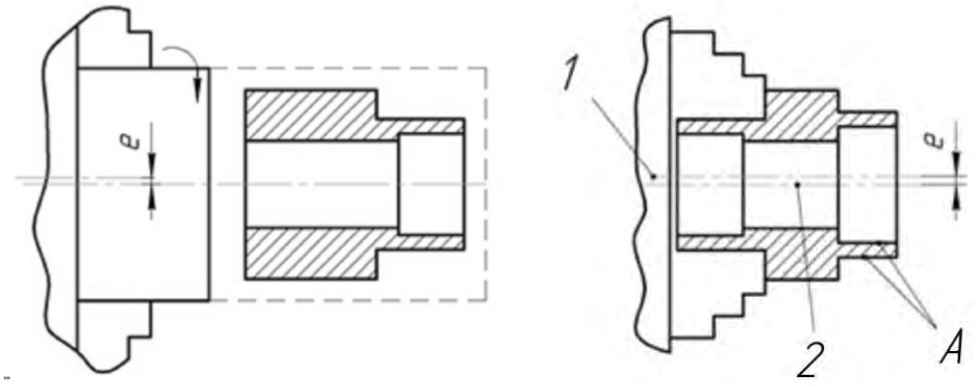


Рисунок 3.106 – Схемы формирования погрешностей формы при точении

К геометрическим погрешностям станочных приспособлений относятся: 1) погрешности расстояний и относительных поворотов установочных и направляющих элементов; 2) погрешности расположения установочных элементов по отношению к основным базам; 3) погрешности формы установочных элементов и основных баз. Степень и способ переноса геометрических погрешностей приспособления на обработанную деталь можно установить только после анализа конкретной ситуации. Например, при изготовлении детали из групповой заготовки с одной установки (рис. 3.107 а) биение установочно-зажимных элементов токарного патрона, а следовательно, и биение заготовки не передается геометрически ступеням детали. Но если требуется доработка детали с другой установки (рис. 3.107 б), то вновь обработанные поверхности *А* будут иметь биение 2*е* относительно технологической базы, т.е. смещение осей *1* и *2*.

Витебский государственный технологический университет



а б

Рисунок 3.107 – Схемы передачи смещения с установочно-зажимных элементов приспособления обработанной детали

Источники *кинематических погрешностей* в цепях подач, деления и огибания металлорежущих станков – это погрешности изготовления и сборки винтовых и зубчатых передач, которые являются элементами кинематической цепи. При обработке с реверсированием движения подачи источником погрешностей могут стать зазоры в передачах. Кинематические погрешности передаются на обработанную деталь чаще всего при формообразовании винтовых и зубчатых поверхностей в виде мгновенной и (или) накопленной ошибок шага, а также в виде погрешности формы. Они могут проявляться также как погрешности позиционирования на горизонтально- и координатно-расточных станках, на обрабатывающих центрах и т.д. Погрешность позиционирования приводит к смещению оси расточенного отверстия или к погрешности выполнения размера.

Для компенсации кинематических погрешностей в станках предусмотрены дифференциальные механизмы с корригирующими элементами типа линеек или кулаков. К достоинствам механических устройств для компенсации кинематических погрешностей относятся относительная простота и достаточно высокая надежность. А главным недостатком является то обстоятельство, что по мере изнашивания элементов передачи необходимо перепрофилировать корригирующий элемент устройства. Поэтому в последнее время в прецизионных станках применяются электронные корректоры с фотодатчиками.

На рисунке 3.108 показана схема компенсации зазоров в зубчатых зацеплениях гитары *3,* в резьбе ходового винта *2* и гайки *1* резьбошлифовального станка, приводящих при шлифовании с реверсом подачи без компенсатора к погрешности толщины нитки резьбы. Шпиндель *7* получает движение от шестерни *4* через палец *5*, который входит в паз диска *6.* Чтобы обеспечить одновременность начала вращения шпинделя и движения стола, при реверсе подачи подбирают рабочий зазор δ в диске *6,* соответствующий сумме зазоров в зубчатых и винтовой пере-

Витебский государственный технологический университет

дачах. Установка необходимого зазора осуществляется на основании замера предварительно прошлифованной резьбы.

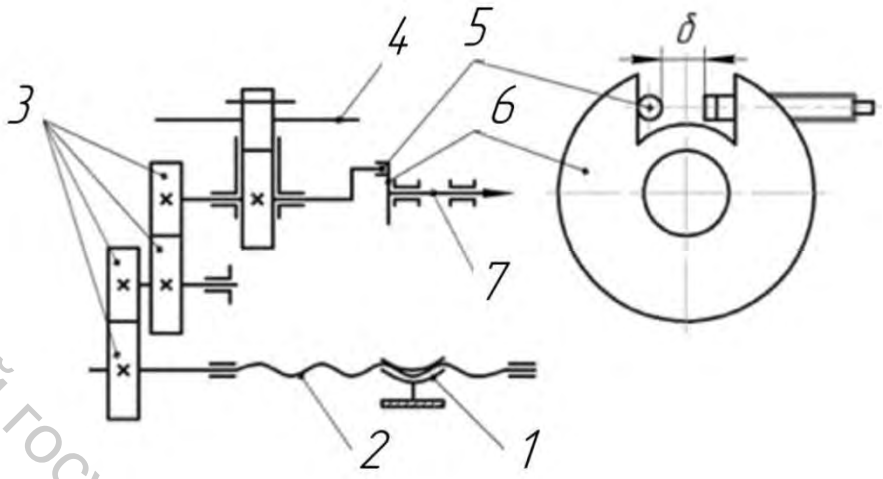


Рисунок 3.108 – Схема компенсации зазора в зубчатых и винтовой передачах механизма подачи резьбошлифовального станка

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 $\Delta_б$ измерительных баз (рис. 3.109) и проявляются как стационарные случайные погрешности обеспечиваемых на данной операции размеров A и B, поскольку в данной задаче размер настройки $A_н$ считается неизменным.

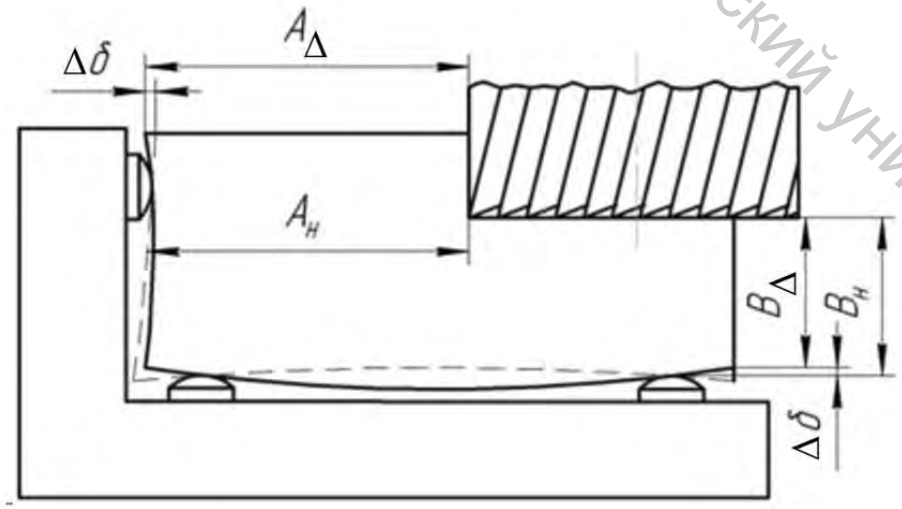


Рисунок 3.109 – Схема формирования погрешности базирования

Витебский государственный технологический университет

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 ССК на компонентах ГМЗ, от которых заданы размеры и показатели угловой ориентации обрабатываемых элементов заготовки.

Пример указанной ситуации приведен на рисунке 3.110. Положение оси обрабатываемого отверстия определяется углом β, 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

$$\Delta_{сб}(A_n) = TD/2.$$

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

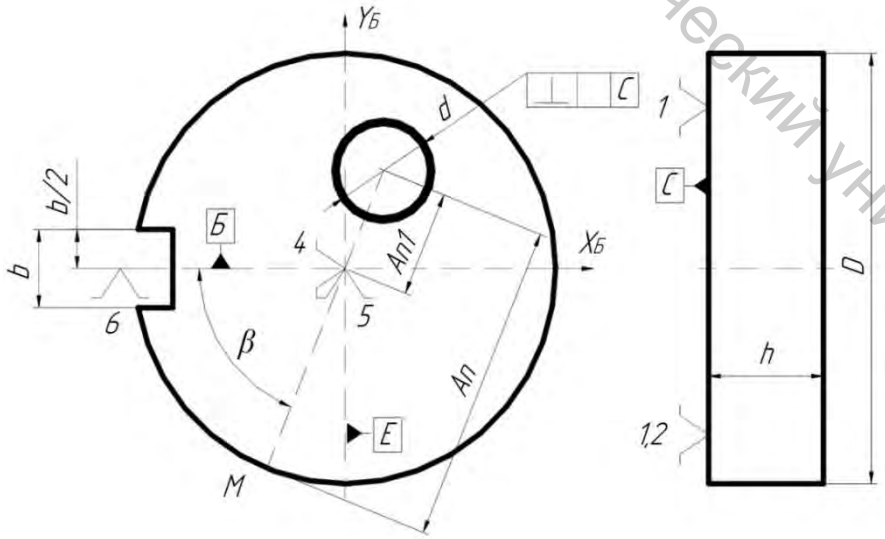


Рисунок 3.110 – Иллюстрация условий для проявления погрешности схемы базирования по размеру

Витебский государственный технологический университет

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. 3.111). 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.

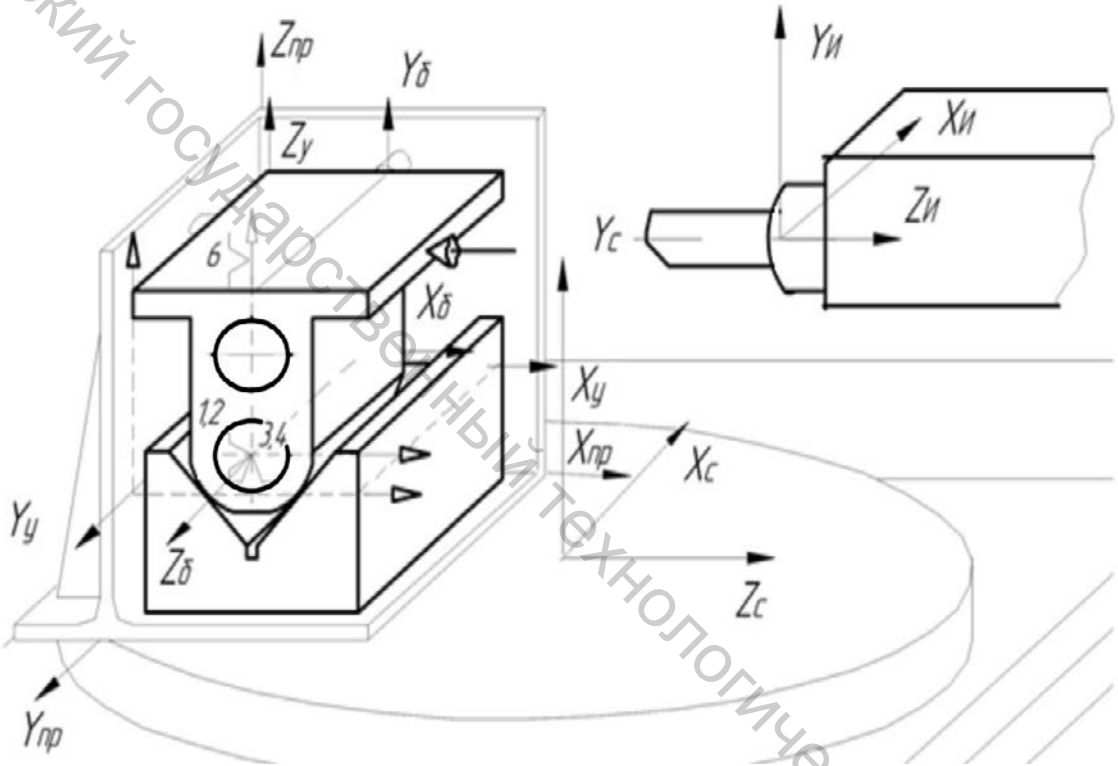


Рисунок 3.111 – Взаимное расположение систем координат:
б – базовая система координат (система координат объекта производства); *у* – установочная (опорная) система координат; *пр* – система координат приспособления; *с* – станок; *и* – инструмент

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

Витебский государственный технологический университет

производства, которые получены на этапах обработки, предшествующих рассматриваемому. Погрешность схемы установки относят обычно к размерам, выполняемым на рассматриваемой операции.

Например, на операции фрезерования выполняются размеры A_2 и B_2 (рис. 3.112), для чего режущие кромки фрезы устанавливаются относительно компонентов ОСК на расстояния, соответствующие размерам настройки $A_н$ и $B_н$. Другие погрешности обработки, возникающие по разным причинам, в данной задаче не учитываются. При выполнении размера A_2 ось $Y_у$ УСК не совпадает с осью $Y_б$ 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 $A_н$ 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.

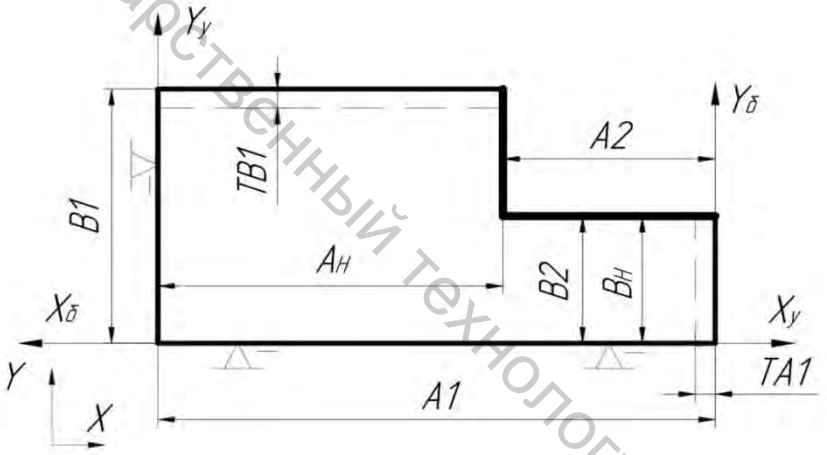


Рисунок 3.112 – Операционный эскиз

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

$$\Delta_{су}(A_2) = TA_1,$$

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

Витебский государственный технологический университет

При выполнении размера B_2 оси $X_б$ (СКО) и $X_у$ (УСК) совпадают. Следовательно, условий для возникновения погрешности схемы установки нет. Действительно, случайные погрешности размера B_1 не влияют на положение $X_б$, 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: на операционном эскизе указываются все выполненные ранее и выполняемые на рассматриваемой операции размеры, СКО и УСК, а также размеры настройки (рис. 3.113 а); строится размерная цепь (рис. 3.113 б); определяется погрешность замыкающего звена, которым является выполняемый размер. При этом погрешность настроечного размера $A_н$ считается равной нулю, так как она, оставаясь постоянной для всей партии обрабатываемых деталей, не может быть источником случайной погрешности.

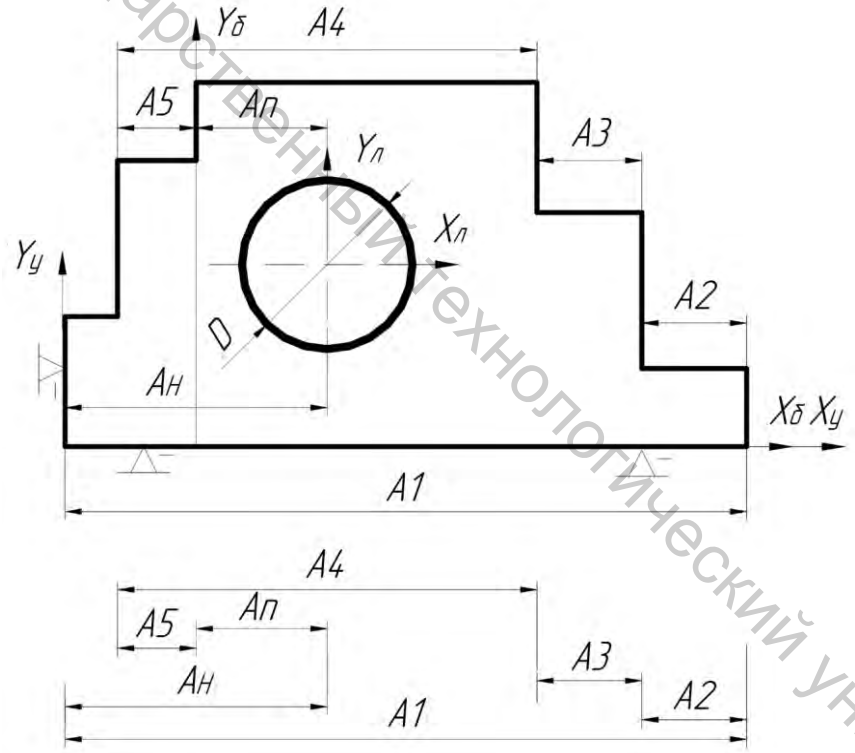


Рисунок 3.113 – Расчетная схема и размерная цепь

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

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

где n – число звеньев размерной цепи.

Витебский государственный технологический университет

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 λ_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 λ_i для нормального закона распределения равен 3, а для закона равной вероятности – 1,732.

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 3.113, 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 3.114 а, изображена на рисунке 3.114 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

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

Витебский государственный технологический университет

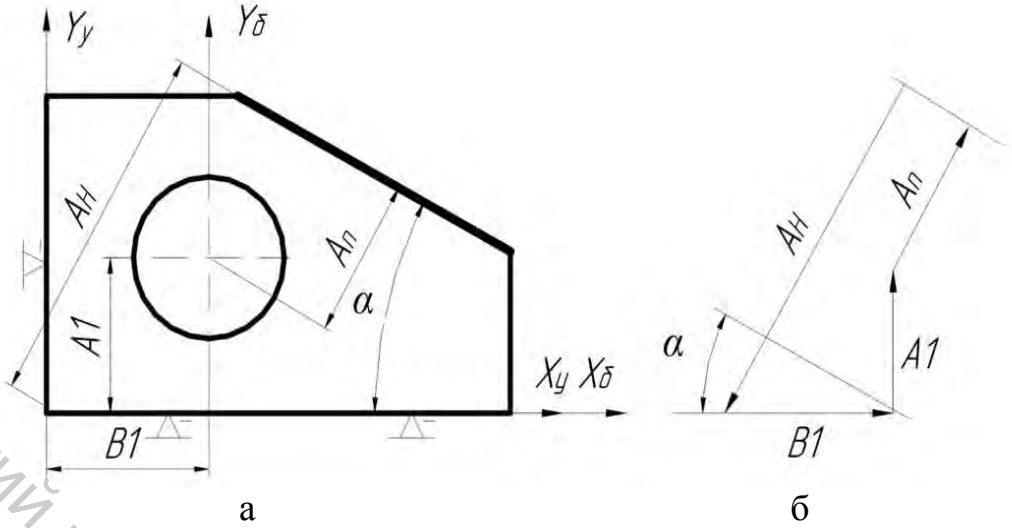


Рисунок 3.114 – Расчетная схема и плоская размерная цепь

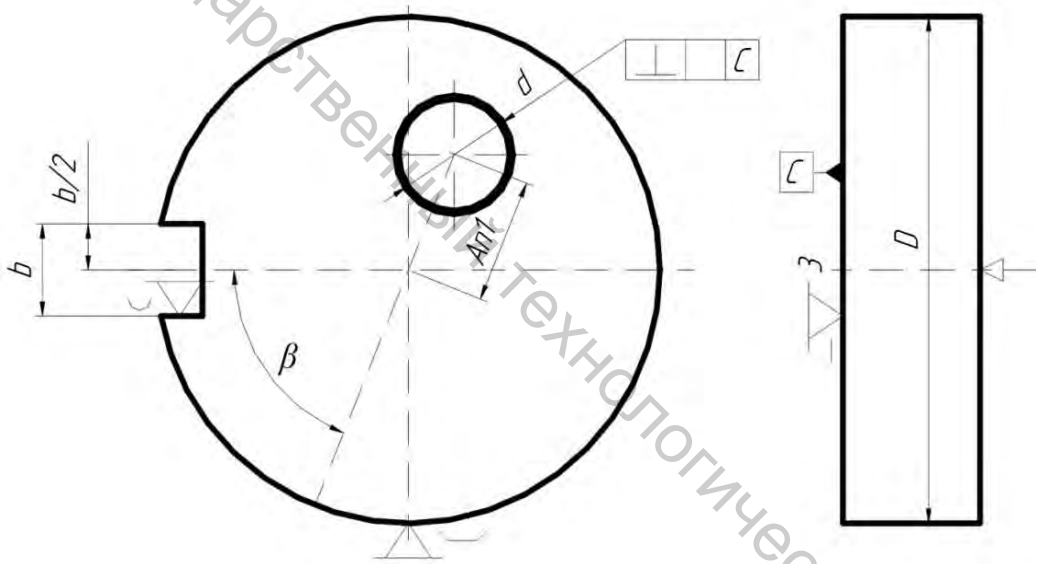


Рисунок 3.115 – Схема установки, соответствующая схеме базирования детали, представленной на рисунке 3.110

Рассмотрим установку по наружной цилиндрической поверхности при помощи призмы для обработки отверстия диаметром *d*. Кроме того, должны быть выдержаны размер A_{n1} и угол β. До рассматриваемой операции были обработаны наружный диаметр *D* с допуском *TD*, шпоночный паз шириной *b* с допуском *Tb*. Соответствующая схема установки показана на рисунке 3.115, а расчетная схема и размерные цепи для расчета погрешности схемы установки – на рисунке 3.116.

Уравнение плоской размерной цепи, показанной на рисунке 3.116 б, имеет вид

Витебский государственный технологический университет

$$A_{н1}\sin\beta + A_{н2}\cos\beta = A_{п1} + OM\sin\beta,$$

где $OM = D/(2\cdot\sin\alpha)$.

Тогда

$$A_{п1} = A_{н1}\sin\beta + A_{н2}\cos\beta - D\sin\beta/2\sin\alpha.$$

Дифференцированием по D получаем

$$d(A_{п1}) = dD\cdot\sin\beta/(2\sin\alpha).$$

Размеры $A_{н1}$, $A_{н2}$ и β от размера D не зависят. Поэтому, заменив дифференциал малыми погрешностями, погрешность схемы установки по размеру $A_{п1}$ можно определить с помощью модели

$$\Delta_{су}(A_{п1}) = TD\cdot\sin\beta/(2\sin\alpha).$$

Из второй размерной цепи (рис. 3.116 в) получаем

$$A_{н1}\sin\beta + A_{н2}\cos\beta = A_п - D/2 + OM\sin\beta.$$

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

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

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

Причем если $\beta = \alpha$, то $\Delta_{су}(A_п) = 0$.

Уравнение размерной цепи, показанной на рисунке 3.116 г, имеет вид

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

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

Тогда дополнительный поворот заготовки (погрешность схемы установки по углу β) будет

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

Витебский государственный технологический университет

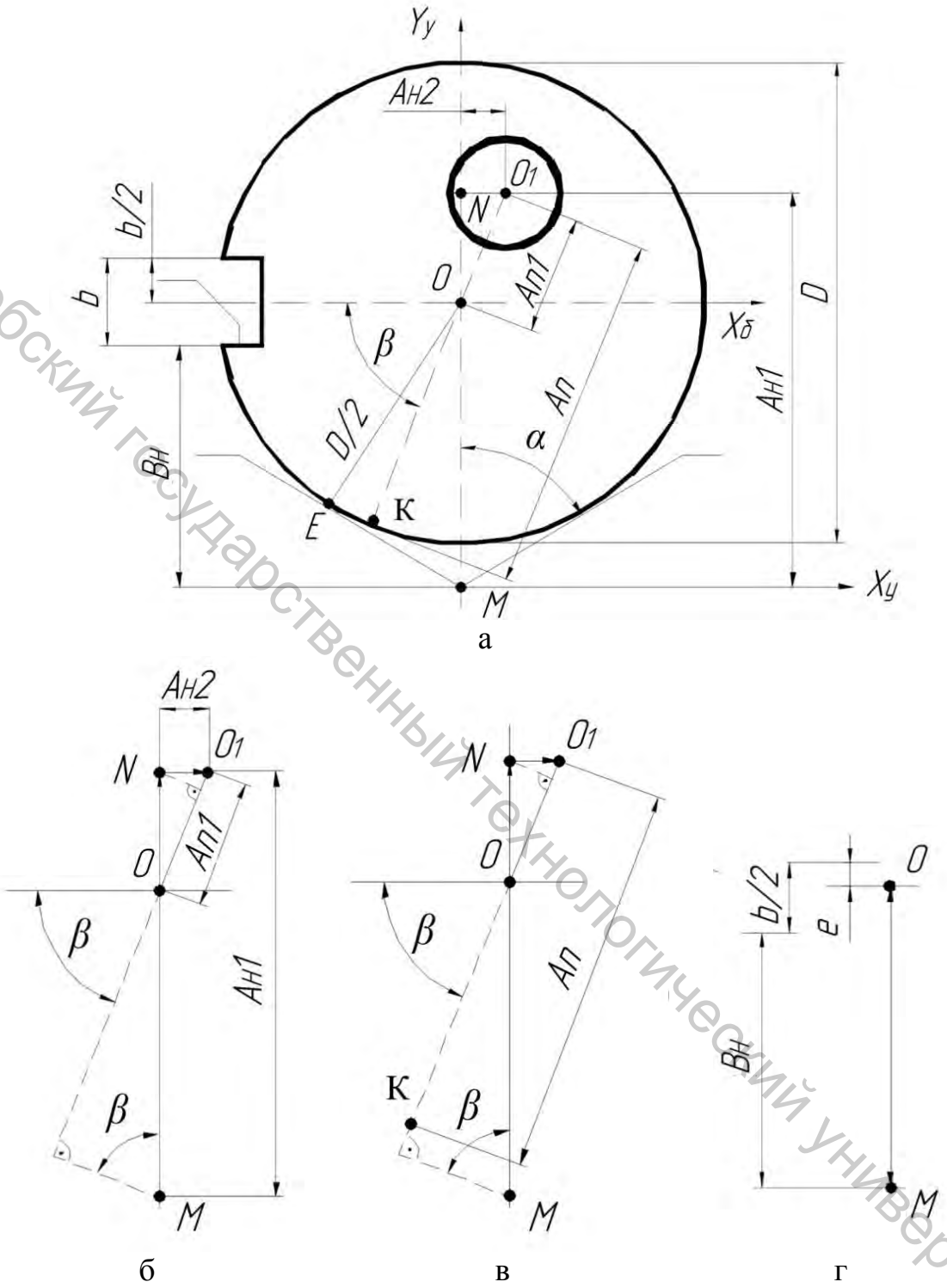


Рисунок 3.116 – Расчетная схема и размерные цепи для определения погрешности схемы установки, представленной на рисунке 3.115

При установке по отверстию на цилиндрический палец возникает неопределенность положения заготовки, которая может смещаться в любом направлении в пределах зазора (рис. 3.117).

Витебский государственный технологический университет

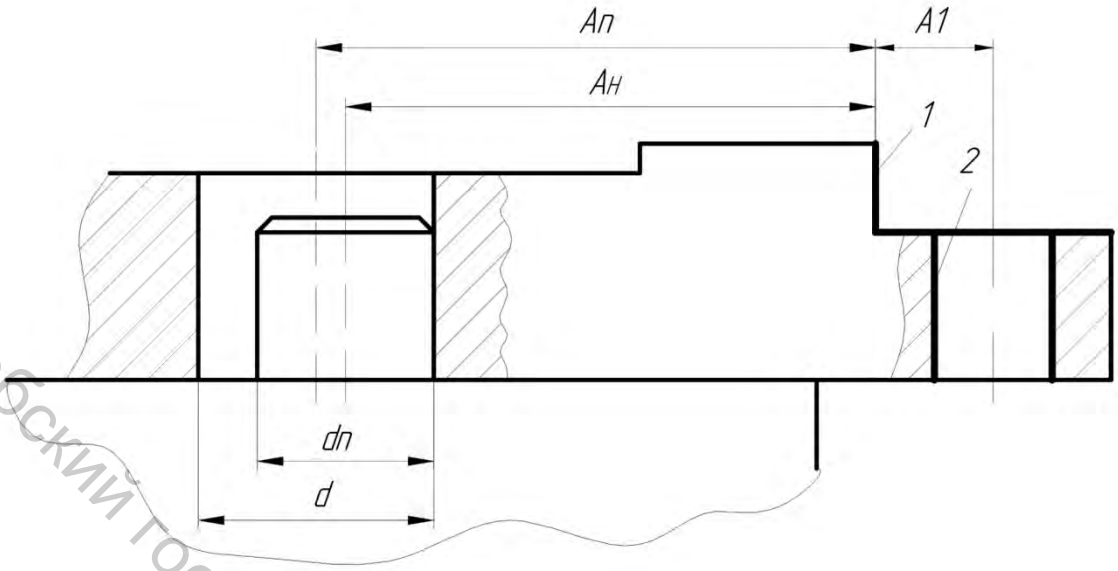


Рисунок 3.117 – Установка заготовки по отверстию на цилиндрический палец

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

$$\Delta_{cy}(A_п) = Td + BO(d_п),$$

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

При обработке нескольких поверхностей с одной установки 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 α будет иметь вид, представленный на рисунке 3.118.

На этой схеме О1, О2 – оси отверстий, П1 – ось симметрии ромбического пальца, П2 – 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.

Витебский государственный технологический университет

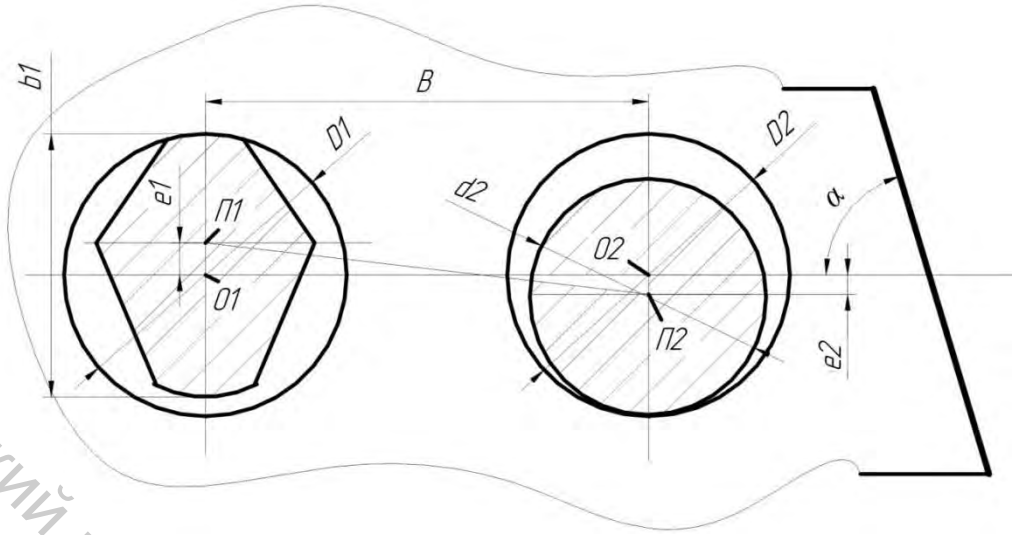


Рисунок 3.118 – Расчетная схема для определения погрешности схемы установки по углу α при установке на цилиндрический и ромбический пальцы

Для анализа пригодности принятой схемы установки нужно оценить *значение* ее погрешности. В примере, представленном на рисунке 3.34, возникают условия для возникновения погрешности схемы установки по размерам 30±0,2 и 45°.

Расчетная схема для определения погрешности схемы установки по размеру 30 – $\Delta_{cy}(30)$ показана на рисунке 3.119. Согласно размерной цепи, показанной на нем, $A_\Delta = A_н \pm e$, где A_Δ – фактический размер, $A_н$ – 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.

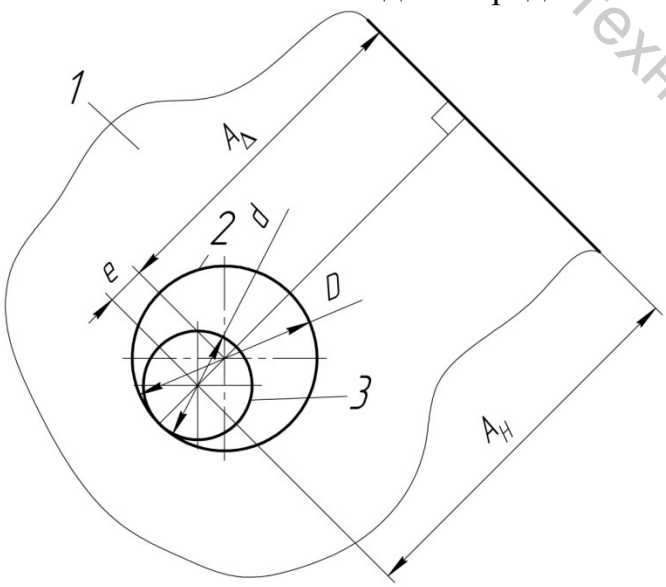


Рисунок 3.119 – Расчетная схема по размеру 30:
1 – заготовка; 2 – отверстие; 3 – палец

Витебский государственный технологический университет

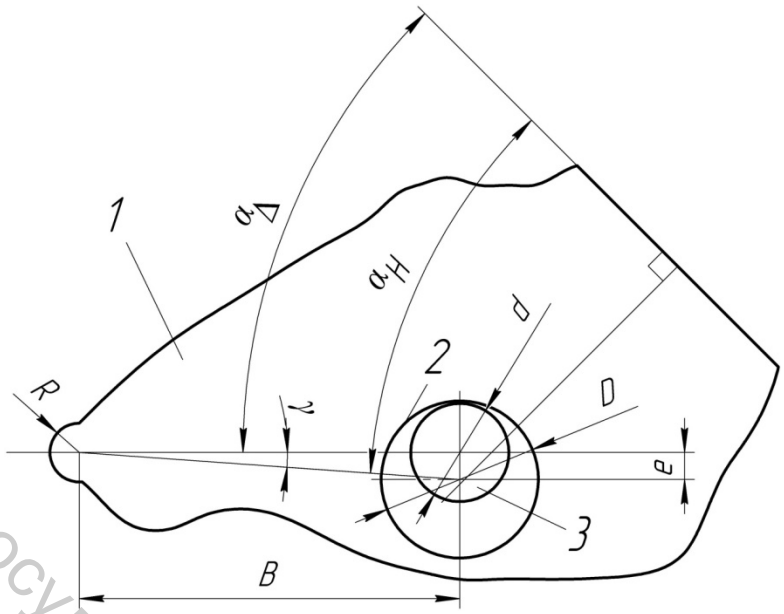


Рисунок 3.120 – Расчетная схема по размеру 45°:
1 – заготовка; 2 – отверстие; 3 – палец

Расчетная схема для определения погрешности схемы установки по размеру 45° показана на рисунке 3.120. Согласно угловой цепи, показанной на нем, $\alpha_\Delta = \alpha_н \pm \gamma$, где α_Δ – фактический угол, $\alpha_н$ – угол настройки, γ – максимальное отклонение угла. Вследствие малости угла γ, 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 $\Delta_{су}(45^o)$ = 2 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.

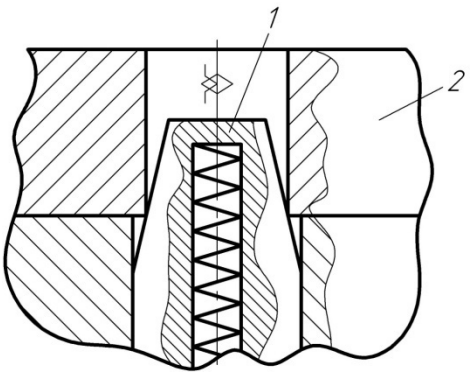


Рисунок 3.121 – Установка заготовки с помощью конического пальца

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 эле-

Витебский государственный технологический университет

ментов используются: 1) подпружиненный конический палец *1* (рис. 3.121); 2) самоцентрирующие установочно-зажимные элементы (цанги, разжимные оправки, гидропластовые зажимы и т.д.). Под действием зажимающих сил изменяются полученное при базировании положение заготовки 2 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 нескомпенсированными 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 3.122, указанное смещение возникает из-за поворота подвижной губки тисков парой сил (зажимающей $P_{заж}$ 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. 3.123). 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. 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° относительная погрешность формы уменьшается в 8...12 раз. Погрешность формы суще-

Витебский государственный технологический университет

ственно уменьшается, если силы зажима прикладываются к торцу тонкостенной или высокоточной втулки.

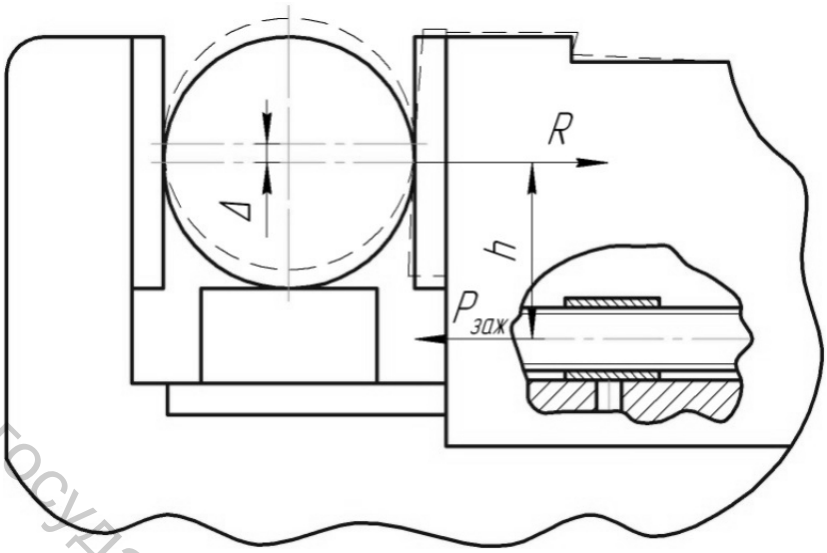


Рисунок 3.122 – Схема смещения заготовки в направлении, перпендикулярном к зажимающей силе

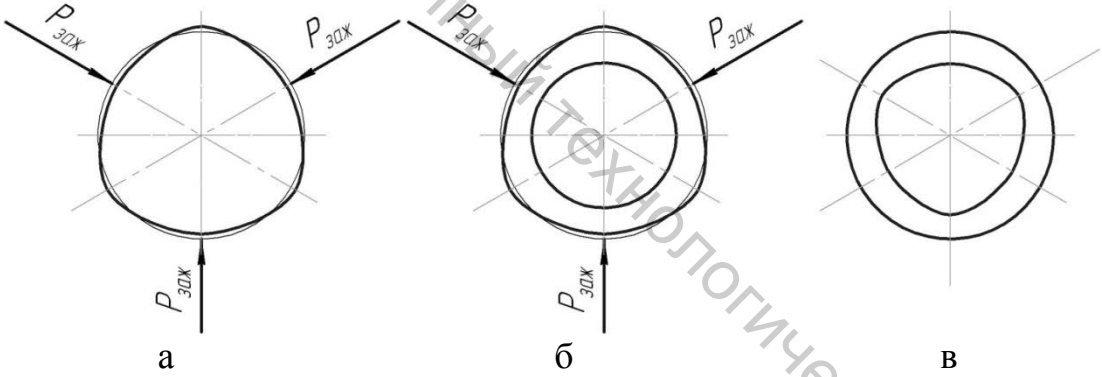


Рисунок 3.123 – Схема формирования погрешности формы при действии зажимающих сил:
а – форма заготовки после закрепления, б – форма расточенного отверстия в закрепленной заготовке, в – форма отверстия после раскрепления заготовки

3.10 Погрешности, зависящие от режима резания

Под действием составляющих силы резания элементы технологической системы деформируются и относительное положение заготовки и инструмента, сообщенное им при базировании и размерной настройке, нарушается. Один из примеров этого процесса показан на рисунке

Витебский государственный технологический университет

3.124, где $A_н$ – размер настройки; $A_{факт}$ – фактический размер; $y_и$ – проекция упругой деформации инструмента; $y_з$ – проекция упругой деформации заготовки с приспособлением. Согласно данной схеме

$$A_{факт} = A_н + y,$$

где y – суммарная проекция упругой деформации технологической системы на плоскость, перпендикулярную к обработанной поверхности.

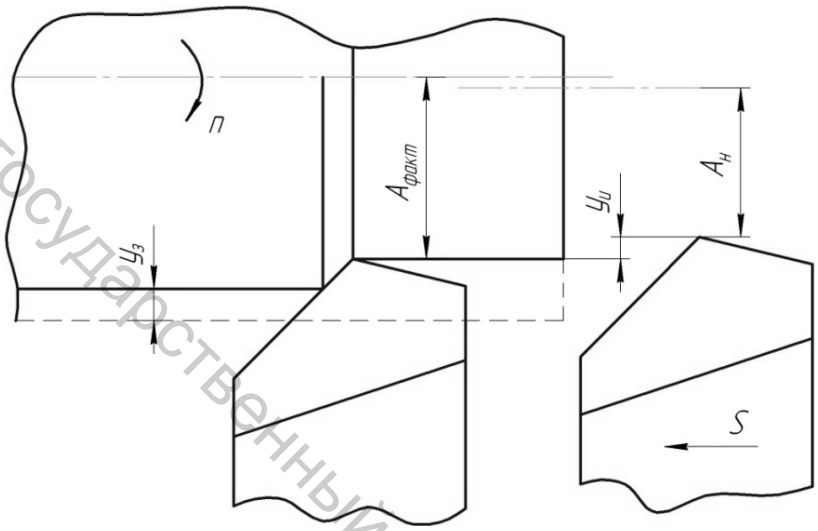


Рисунок 3.124 – Схема деформации технологической системы под действием сил резания

С учетом эмпирической зависимости упругой деформации можно записать выражение следующим образом:

$$A_{факт} = A_н + C_p t^{x1} S^{y1} HB^n / j,$$

где t – глубина резания; S – подача, HB – твердость заготовки по Бринеллю; $x1$, $y1$, n и C_P – параметры модели зависимости силы P_y от режима резания и свойств заготовки; j – жесткость технологической системы.

Случайные изменения размеров заготовки ведут к соответствующим изменениям глубины t, что изменяет второе слагаемое выражения. Следовательно, будет изменяться фактический размер и появится погрешность обработки как результат «наследования» погрешности заготовки. Назовем *коэффициентом наследования* $K_{нас}$ отношение погрешности детали $\Delta_Д$ к погрешности заготовки $\Delta_З$. Обратное отношение $\Delta_З / \Delta_Д$ будем называть *коэффициентом уточнения* $K_{ут}$.

Витебский государственный технологический университет

Заменив малые изменения Δ_t и Δ_y их дифференциалами, с учетом формул получим для случая однократного точения твердосплавным резцом

$$K_{\text{ут}} = \frac{jt^{0,1}}{0,9C_p S^{0,6} HB^2}.$$

Из данного выражения следует, что коэффициент уточнения прямо пропорционален жесткости технологической системы, слабо зависит от глубины резания, существенно уменьшается при увеличении твердости заготовки и подачи. Затупление резца, увеличивая значение C_P, снижает коэффициент уточнения.

При обработке наследуется не только погрешность размера заготовки, но и погрешности формы и относительного положения, ведущие к изменению глубины резания. Случайные изменения твердости заготовки также приводят к появлению погрешности размера. Изменение жесткости технологической системы, вызванное изменением состояния станка (нагрев подшипников) или изменением координаты точки приложения силы резания, также приводит к появлению погрешности соответственно размера или формы.

Чтобы увеличить коэффициент уточнения, а это особенно важно при низкой жесткости технологической системы, необходимо удалить припуск за несколько *(n)* проходов. Тогда, если жесткость технологической системы не зависит от координат точки приложения силы резания, общий коэффициент уточнения равен произведению коэффициентов уточнения после каждого прохода, т.е.

$$K_{\text{ут}} = K_{\text{утт}} K_{\text{утт}} \ldots K_{\text{ут n}}.$$

В процессе обработки режущий инструмент изнашивается, что приводит к появлению погрешности размера и (или) формы поверхности. Размерный износ инструмента в направлении, перпендикулярном к обрабатываемой поверхности, ведет к увеличению (уменьшению) размера настройки ($A_{\text{н}}$) и, кроме того, к увеличению силы P_y, а следовательно, к увеличению упругой деформации *y*. Изнашивание таких многолезвийных инструментов, как сверла и зенкеры, ведет к некоторому увеличению увода оси обработанного отверстия, а изнашивание разверток – к значительному увеличению разбивки отверстия (т.е. разности между диаметром отверстия и диаметром развертки).

Для увеличения размерной стойкости необходимо повышать качество заточки (прижоги, микротрещины, $Ra > 0,6$ мкм снижают стой-

Витебский государственный технологический университет

кость в 2...3 раза), выполнять на режущей кромке фаску размером 0,05 мм под углом γ =-45° или радиусное скругление на режущей кромке. Наименьший размерный износ имеет резец со скругленной режущей кромкой, если радиус скругления $\rho = 0{,}04 \ldots 0{,}05$ мм. Наилучшим способом повышения размерной стойкости является нанесение износостойких вакуумно-плазменных покрытий (TiN или трехслойных TiC + TiCN + TiN), которые повышают почти в 2 раза микротвердость режущих пластин из твердого сплава Т15К6 и в 4...5 раз их стойкость при чистовой обработке.

Одной из особенностей процесса изнашивания шлифовального круга является происходящее одновременно с изнашиванием формирование волнистости на его рабочей поверхности. Экспериментально установлено, что чем меньше диаметр круга и его высота, тем быстрее возникают волны на его рабочей поверхности; высота волн на круге пропорциональна скорости его размерного изнашивания и может достигать 10...30 мкм. Волнистость рабочей поверхности круга существенно увеличивает амплитуду колебаний и высотные параметры шероховатости шлифованной поверхности. Поэтому высота волн является основным ограничением стойкости шлифовального круга, который работает в режиме затупления и (или) частичного самозатачивания.

Существенное влияние на точность обработки размерный износ круга оказывает при глубинном и профильном шлифовании, при шлифовании резьбы и шлицев, так как в этих случаях часть размеров шлифованной поверхности копирует соответствующие размеры шлифовального круга.

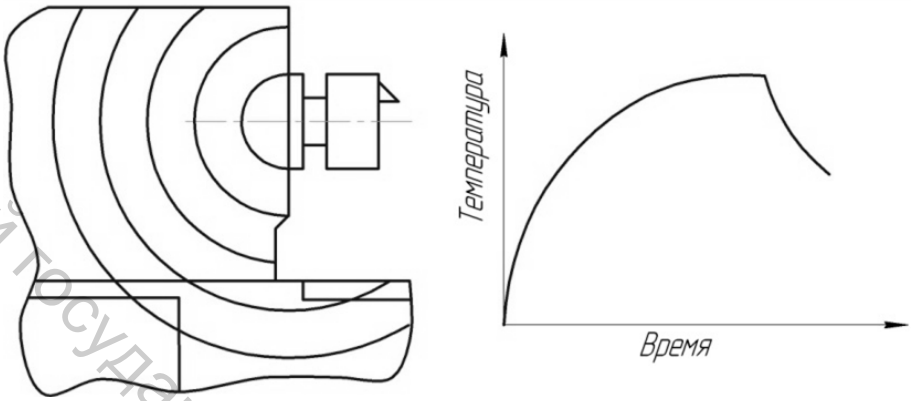
3.11 Прочие погрешности при механической обработке

В процессе механической обработки элементы технологической системы нагреваются. Причины нагрева – процесс резания, трение в различных соединениях станка, процессы дросселирования в гидроаппаратуре, теплота от внешних источников. Из-за перерывов в работе и большой тепловой инерции тепловое поле элементов технологической системы обычно бывает неравномерным и нестационарным. Тепловые циклы определяются: временем обработки одной заготовки; длительностью смены (или ее половины); годом, в течение которого изменяется температура в цехе.

Пример температурного поля и изменения температуры во времени показаны на рисунке 3.125. Разность температур в отдельных элементах станка составляет 5…50 °С. Наиболее высокая температура наблюдается в области подшипников шпинделя и быстроходных валов. Такой неравномерный нагрев приводит к тепловой деформации систе-

Витебский государственный технологический университет

мы «станок – приспособление – инструмент», которая нарушает геометрическую точность станка (параллельность, перпендикулярность, прямолинейность) и его размерную настройку. Наблюдения и расчеты показали, что потеря точности от тепловых деформаций элементов станка сопоставима, а иногда и превосходит по значению допускаемую погрешность обработки (табл. 3.19).



а б

Рисунок 3.125 – Температурное поле:
а – схема температурного поля передней бабки токарного станка,
б – график изменения температуры при работе и выключении станка

Таблица 3.19 – Примеры тепловых погрешностей

Элемент станка	Вид погрешности детали	Уровень погрешности
Колонна расточного станка	Непараллельность оси отверстия и основной базы	0,12 мм/м
Станина токарного станка	Седлообразность	0,15 мм/м
Передняя бабка токарного станка	Уменьшение диаметра	0,008...0,05 мм
	Конусность на длине 300 мм	0,006...0,04 мм
	Осевое смещение шпинделя	0,25 мм
Колонна плоскошлифовального станка	Непараллельность торцов	0,1 мм/м
	Осевое смещение шпинделя	0,15 мм

Уменьшить влияние температурных деформаций станка на точность и стабильность размеров и формы обработанных деталей можно следующим образом: 1) оградив станок от теплового воздействия внешней среды (термоконстантные цехи, защита от направленных потоков нагретого или холодного воздуха); 2) защитив станок от неравномерного нагрева со стороны источников интенсивного тепловыделения (встроенных электродвигателей, гидроприводов, резервуаров для масла) путем выделения их из общей компоновки станка; 3) приняв меры для выравнивания температурного поля станин и стоек (применив охлаждающие ребра на наиболее нагретых частях, использовав потоки воздуха от электродвигателей и пневмоустройств для обдува более холод-

Витебский государственный технологический университет

ных элементов и т.д.); 4) подогревая более холодные элементы станка, масло в гидробаке и весь станок перед началом работы до получения стационарного теплового поля; 5) увеличив частоту коррекции размерной настройки в начальный период работы станка.

Для уменьшения температурных деформаций инструмента, влияющих на точность обработки, применяют обильное охлаждение. Обработка на токарном станке с охлаждением 5%-й эмульсией (расход 1,75 л/мин) увеличивает теплоотдачу инструмента в 15 раз по сравнению с обработкой без охлаждения. Температурные деформации обрабатываемых заготовок также являются источником погрешности обработки. Теплота, выделяющаяся в процессе резания, распределяется между стружкой, инструментом и заготовкой. При точении, фрезеровании, строгании и растачивании без охлаждения большая часть выделяющегося количества теплоты переходит в стружку, а при сверлении большая часть теплоты остается в заготовке. При токарной обработке в стружку уходит 50...86 % теплоты, 10...40 % переходит в резец, а остальная остается в обрабатываемой заготовке и рассеивается в окружающую среду. При сверлении в стружку уходит 28 % выделяющейся теплоты, 14,5 переходит в сверло, 52,5 % остается в заготовке, а остальная уходит в окружающую среду.

Применение обильного охлаждения позволяет практически устранить нагревание детали, и в большинстве случаев ее тепловыми деформациями можно пренебречь. Но тепловые деформации тонкостенных заготовок с относительно большими обрабатываемыми поверхностями и неравномерной толщиной стенок могут достигать значений, сопоставимых с допусками 6-го квалитета точности. Так, например, при шлифовании поршня некруглость наружной шлифованной поверхности из-за наследования конфигурации внутренних элементов составляет 9 мкм.

Серьезным источником погрешностей является деформация (коробление) заготовки или детали, вызванная нарушением равновесия остаточных напряжений. Условно назовем эти погрешности *релаксационными.* Остаточные напряжения возникают на всех этапах изготовления детали, от заготовительных операций до отделочных, в результате неравномерных изменений удельного объема материала, вызванных неоднородными: нагревом или охлаждением заготовки либо детали; структурными превращениями при термической и химико-термической обработке; пластическим деформированием подповерхностных слоев заготовки. Часто одновременно действуют две причины.

В качестве примера рассмотрим первый из механизмов формирования остаточных напряжений при остывании нагретого до 800 °С стального диска. Сначала остывают наружные слои, которые, стремясь сократиться, сжимают еще горячую сердцевину. В результате наружные слои упругопластически растягиваются, а внутренние подвержены всестороннему сжатию и не могут деформироваться. При постепенном

Витебский государственный технологический университет

остывании и выравнивании температурного поля сердцевина стягивает пластически вытянутый наружный слой, создавая в нем напряжения сжатия. Во внутренней части диска формируются растягивающие напряжения, которые уравновешивают напряжения сжатия наружных слоев.

При закалке на рассмотренный выше процесс неравномерного уменьшения объема накладывается увеличение удельного объема в момент перехода от аустенита к мартенситной структуре. На уровень и распределение напряжений в материале после термической обработки влияют конфигурация детали, равномерность нагрева, прокаливаемость, температура отпуска.

Возникшие в детали остаточные напряжения не остаются постоянными, а с течением времени релаксируют в сторону уменьшения. Релаксация остаточных напряжений обычно сопровождается общей деформацией детали, иногда настолько значительной, что она визуально наблюдается или приводит к трещинам. При нормальной температуре релаксация развивается очень медленно (до нескольких лет) или совсем не наблюдается. Внешние переменные нагрузки и нагрев деталей ускоряют процесс релаксации напряжений.

Искусственное нарушение равновесия остаточных напряжений путем удаления припуска при механической обработке ведет к медленному деформированию заготовки и проявляется при передаче предварительно обработанной заготовки на последующую чистовую обработку (без разрыва во времени между этими этапами). Деформирование продолжается после приемки детали и в процессе ее эксплуатации в машине и достигает у маложестких деталей довольно больших значений (до 1...1.5 мм).

Основным способом борьбы с релаксационными погрешностями является старение, которое выполняется обычно после предварительной обработки, а иногда в целях получения деталей высокой точности и после чистовой обработки перед отделочной. При длительной выдержке чугунных отливок в заделе в течение 6...18 месяцев (естественное старение) остаточные напряжения уменьшаются только на 30...35 %. Полное снятие остаточных литейных напряжений (искусственное старение) достигается отжигом с медленным (со скоростью 50... 150 °*C* в час) нагревом отливок до 500...550 °*C*, выдержкой при этой температуре в течение 2...10 ч и медленным охлаждением (со скоростью 30...50 °*C* в час) до 200...300 °*C*.

Старение стальных закаленных деталей заключается в их нагреве до 150...180 °*C* и выдержке при этой температуре в течение 5...25 ч. Оно применяется для измерительных инструментов, точных деталей топливной аппаратуры и т.д.

Витебский государственный технологический университет

3.12 Обеспечение точности обработки

3.12.1 Характеристики точности и стабильности технологического перехода

За время реализации перехода на технологическую систему действует множество факторов, часть которых (износ инструмента, тепловые деформации и т.п.) вызывает систематические, а часть (колебания припуска, колебания твердости заготовки и т.п.) – случайные погрешности обработки. Кроме того, зависимости, связывающие отклонения размеров с порождающими их факторами, не только не являются функциональными (детерминированными), но и не сохраняются неизменными во времени. Так, коэффициенты регрессионного уравнения, которое описывает зависимость между износом инструмента и отклонением размера, существенно изменяются по мере потери инструментом режущей способности (сказывается дополнительное влияние изменения уровня силы P_y от износа инструмента).

Под воздействием всех факторов формируются отклонения обработанной поверхности от ее идеального образа (компоненты погрешностей формы и размеров). Изменение интегральной размерной характеристики обработанной поверхности (диаметр, высота и т.д.) для совокупности последовательно обработанных деталей можно считать реализацией случайной последовательности, которая длится в течение периода времени между коррекциями размерной настройки или сменами затупившегося инструмента.

Случайная последовательность описывается следующими функциями:

1) уравнением регрессии

$$\overline{A}(i) = M\left(\frac{A}{i}\right),$$

где *M(A/i)* – условное математическое ожидание параметра *A* при заданном значении *(i)* порядкового номера обработанной детали;

2) уравнением дисперсии

$$D(A(i)) = M(A(i)) - \overline{A}(i))^2;$$

3) корреляционным уравнением

$$K(i_1, i_2) = M((A(i_1)) - \overline{A}(i_2))(A(i_2) - \overline{A}(i_1))),$$

Витебский государственный технологический университет

где M – символ математического ожидания. Функция $\overline{A}(i)$ является неслучайной, отражающей влияние детерминированных факторов на исследуемый параметр. Функция $D(A(i))$ характеризует неслучайную зависимость параметра рассеяния размера от порядкового номера обработанной детали. Считается, что эти параметры характеризуют так называемую «мгновенную» точность обработки. Корреляционное уравнение отражает тесноту связи значений A для деталей с номерами i_1 и i_2.

Дело в том, что влияние некоторых факторов на отклонения размера A в данном цикле обработки не сразу прекращается в последующих циклах. Примером может служить тепловая деформация технологической системы, вызванная случайными отклонениями от средних значений припуска и твердости заготовки. Возникшая на i-м цикле вследствие разогрева (по указанной причине) деформация системы должна сказаться не только на отклонении размера детали, обработанной на этом же цикле, но и на отклонениях размеров в циклах $i+1$, $i+2$ и т.д. Если $K(i_1, i_2) = 0$, то значения $A(i_1)$ и $A(i_2)$ являются независимыми.

В зависимости от свойств технологической системы возможны различные по типу случайные процессы:

– стационарные, если $\overline{A}(i) = const$, $D(A(i_1)) = const$, $K(i_1, i_2) = K(\Delta_i)$, где $\Delta_i = i_2 - i_1$;

– нестационарные, если A или D изменяется в зависимости от номера обработанной детали.

Функции $\overline{A}$, D и K можно определить экспериментально, если имеется достаточное число реализаций. Когда процесс стационарный, для определения параметров указанных функций достаточно одной реализации. Однако и в случае нестационарного по A процесса, который чаще всего встречается при механической обработке, с достаточной для практики точностью можно для определения параметров функций $\overline{A}$, D и K использовать одну реализацию. Для этого необходимо разделить размер $\overline{A}(i)$ на две составляющие (рис. 3.126):

$$A(i) = \overline{A}(i) + X(i),$$

где $X(i)$ – отклонения размера A от кривой регрессии $\overline{A}(i)$, которая получается «сглаживанием» результатов эксперимента полиномом по методу наименьших квадратов. Таким образом,

$$\overline{A}(i) = b_0 + b_1 i + b_2 i^2,$$

Витебский государственный технологический университет

где b_1 – коэффициент полинома.

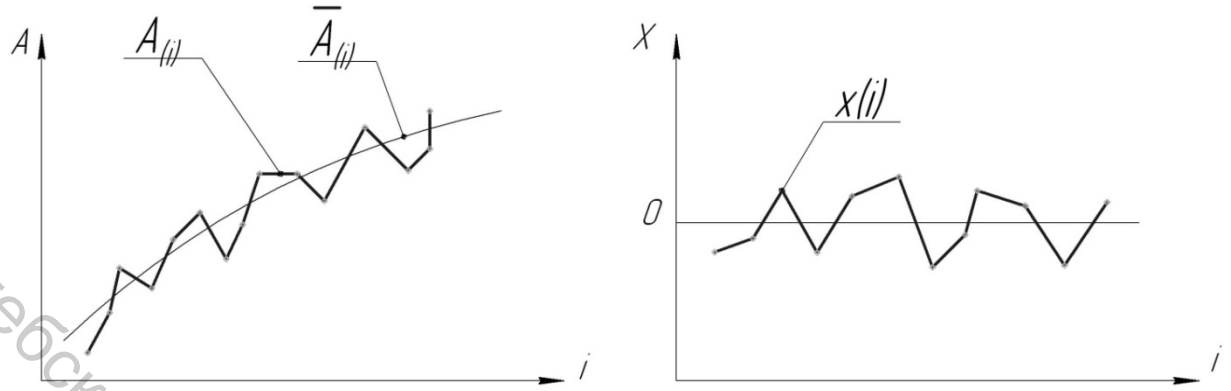


Рисунок 3.126 – Схемы разделения погрешностей обработки

Дисперсия процесса в данном случае оценивается величиной S^2:

$$D(X(i)) = S^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n}(A(i) - \overline{A}(i))^2}{n-1}.$$

Предполагается, что случайные отклонения *X(i)* складываются из двух: *V(i)* – корригированной случайной составляющей, вызываемой случайным фактором с последствием, и *Z(i)* – независимой случайной составляющей, т.е.

$$X(i) = V(i) + Z(i).$$

Если известны значения *A(i)* для $i = \overline{1, n}$, то значения корреляционной функции определяются по выражению

$$K(p) = \frac{\sum_{i=1}^{n-p} A(i)A(i+p)}{n-p}.$$

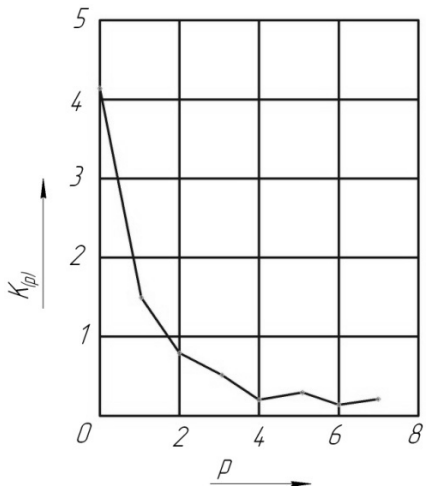


Рисунок 3.127 – График корреляционной функции центрированных отклонений размеров

Типовой график корреляционной функции показан на рисунке 3.127. Степень тесноты связи между соседними значениями *A(i)* и *A(i+1)* характеризуется коэффициентом корреляции ρ:

Витебский государственный технологический университет

$$\rho = \frac{K(1)}{D(X(i))}.$$

3.12.2 Статистическое регулирование точности обработки

Статистическое регулирование является простым и наглядным методом управления точностью обработки [2–5, 92–94]. Для его реализации на предварительно настроенном станке через определенные промежутки времени берутся выборки из *m* деталей, обработанных последними в данном промежутке. Детали измеряются, и результаты измерения заносятся в контрольную карту в виде точек, которые должны располагаться в пределах, заранее рассчитанных и нанесенных на контрольную карту границ. Тогда считается, что технологический процесс протекает удовлетворительно. В случае выхода размеров за пределы контрольных границ необходимо выполнить коррекцию размерной настройки. Таким образом, статистическое регулирование дает возможность осуществить предупредительный контроль и избежать брака при обработке, а также снизить трудоемкость контрольных операций, так как вместо сплошного контроля осуществляется выборочный.

Условиями целесообразности применения статистического регулирования являются: массовое производство; наличие систематической нестационарной составляющей общей погрешности обработки; достаточно большой период размерной стойкости инструмента; достаточный запас точности операции, который характеризуется коэффициентом запаса точности $K_{З.Т}$:

$$K_{З.Т} = \frac{TA}{6\sqrt{D(X(i))}},$$

где *TA* – допуск на контролируемый размер; *D(X(i))* – дисперсия. Минимальное значение $K_{З.Т}$ – 1,2.

Стандартизованы и применяются в промышленности два метода статистического регулирования: 1) *метод средних и размахов;* 2) *метод медиан и крайних значений.* Первый метод рекомендуется применять в случаях, когда требования к точности достаточно высоки и когда необходимо обеспечить безопасность потребителя (авиационная техника, автомобили и т.п.). Второй метод проще реализовать, так как он не требует вычислений, но дает менее достоверные результаты.

Для реализации метода средних и размахов подготавливают заранее две точечные диаграммы, обычно объединенные в одну контроль-

Витебский государственный технологический университет

ную карту (рис. 3.128). На точечной диаграмме средних отмечают верхнюю (*ВТ*) и нижнюю (*НТ*) технологические границы. При наружной обработке ВТ совпадает с максимальным размером $A_{\max}$, а *НТ* выше нижней границы допуска на погрешность измерения. При обработке отверстий наоборот: *НТ* совпадает с минимальным размером, а *ВТ* ниже верхней границы допуска на погрешность измерения $\Delta_{ИЗ}$. Обычно принимают $\Delta_{ИЗ} = 0{,}1TA$.

Допустимое поле изменения среднего арифметического $\overline{A_m}$ малой выборки ограничивается верхней (*ВК*) и нижней (*НК*) контрольными границами, которые отстоят от *ВТ* и *НТ* на одинаковом расстоянии *l*. В зависимости от значения $K_{З.Т}$ значение *l* выбирается по-разному. Если $1{,}18 < K_{З.Т} < 1{,}34$, то $l = KTA$, где *К* – коэффициент, зависящий от размера выборки *m* следующим образом:

m, шт.	……	4	5	6	7	8	9
К	……	0,25	0,276	0,296	0,311	0,323	0,344

Если $K_{З.Т} > 1{,}35$, то значение *l* выбирается в зависимости от оценки «мгновенного» поля рассеяния, которая также определяется в предварительных экспериментах. Тогда

$$l = 0{,}5\omega A(1 - \frac{1}{\sqrt{m}}).$$

На диаграмме размахов в пределах от нижней границы допуска до *ВТ* наносится одна верхняя граница размахов (*ВГР*), которая определяет допустимые значения размахов $R = A_{\max} - A_{\min}$ в любой выборке. Если $1{,}18 < K_{З.Т} < 1{,}34$, то ВГР = K_1TA, где K_1 зависит от размера выборки следующим образом:

m, шт.	……	4	5	6	7	8	9
K_1	……	0,780	0,815	0,840	0,860	0,875	0,890

Если $K_{З.Т} > 1{,}35$, то значение *l* выбирается в зависимости от определенного заранее мгновенного стандартного отклонения размеров *S*. *ВГР* = K_2S, где K_2 зависит от размера выборки:

m, шт.	……	5	6	7	8	9
K_2	……	4,918	5,078	5,206	5,307	5,394

Витебский государственный технологический университет

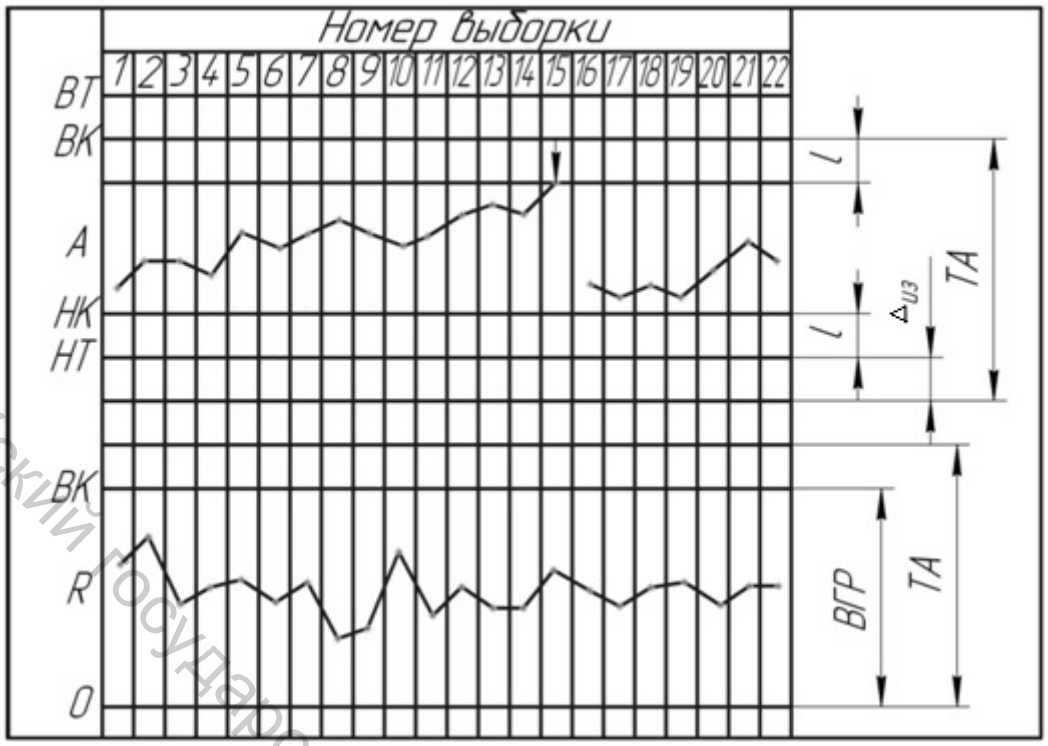


Рисунок 3.128 – Контрольная карта статистического регулирования методом средних и размахов

Необходимо отметить, что указанный расчет контрольных границ на контрольных картах статистического регулирования допускает возможность появления ошибок первого и второго рода. Ошибки первого рода заключаются в подаче ложного сигнала о разладке процесса, которой на самом деле нет. Ошибки второго рода состоят, наоборот, в неправильном заключении о нормальном ходе процесса, когда на самом деле он уже разлажен. Вероятность таких ошибок при наблюдении за средними или медианами составляет 0,027. Эта вероятность очень мала, однако ложный сигнал может появиться и при очень малой вероятности. Поэтому во избежание ненужных вмешательств в процесс обработки рекомендуется при появлении сигнала о разладке процесса тотчас же проверить его путем взятия повторной выборки.

С экономической точки зрения выгодно увеличивать промежуток времени между взятием контрольных проб. Но при увеличении длительности межпроверочного периода $\tau_{кон}$ возрастает вероятность брака. Оптимальное значение $\tau_{кон}$ определяется экспериментально при внедрении технологического процесса со статистическим регулированием точности. Анализ контрольных карт, оформленных за время эксплуатации нескольких инструментов (10...15), позволяет определять среднее значение размерной стойкости инструмента по количеству обработанных заготовок N_3 и поле его рассеяния ωN_3, где N_3 – среднее количество заготовок, обработанных за период между коррекциями размерной

Витебский государственный технологический университет

настройки. В течение периода, соответствующего $N_з - 0{,}5\omega N_з$, необходимо выполнить не менее четырех контрольных операций, что позволит определить темп смещения уровня размерной настройки и сделать прогноз о количестве заготовок, которые могут быть обработаны до необходимости в коррекции.

3.12.3 Автоматическое управление точностью обработки по выходным данным

Выходным параметром технологической операции может быть непосредственно размер обработанной заготовки, измеряемый прямым или косвенным способом, положение режущей кромки инструмента (рабочей поверхности шлифовального круга) или положение исполнительных органов станка. Задача компенсации действия источников технологических погрешностей решается с максимальной эффективностью в том случае, когда выходным параметром является непосредственно размер обрабатываемой заготовки. Этот параметр может контролироваться после обработки заготовки (вне зоны обработки) или во время ее обработки.

По результатам контроля система управления вырабатывает управляющую команду либо на коррекцию размерной настройки, либо на изменение скорости и направления рабочей подачи. В первом случае различают одностороннюю и двустороннюю коррекции размерной настройки. Односторонняя коррекция уровня размерной настройки применяется чаще всего при обработке на станках с непрерывным процессом. Исполнительные органы таких станков в процессе обработки не имеют подачи в направлении выполняемого размера, в этом направлении их сдвигают только для изменения уровня настройки. К станкам данной группы относятся бесцентрово-шлифовальные, работающие методом «на проход», плоскошлифовальные для глубинного шлифования и др. Доминирующим фактором, определяющим смещение уровня размерной настройки этих станков, является износ шлифовального круга. Обычно его влияние настолько сильнее влияния прочих факторов, что уровень настройки получает лишь одностороннее смещение. Поэтому при коррекции уровня настройки таких станков подаются командные импульсы лишь одного знака, в соответствии с которыми смещаются массивные рабочие органы станка.

На рисунке 3.129 показана принципиальная схема односторонней коррекции уровня настройки при бесцентровом шлифовании колец подшипников. Прошлифованные кольца, двигаясь сплошным потоком, поступают на позицию измерения и контролируются измерительным устройством (*ИУ*). Результаты измерения (в виде уровней напряжения)

Витебский государственный технологический университет

поступают в счетно-логическое устройство (*СЛУ*), которое по определенному алгоритму вырабатывает команду, передаваемую исполнительному устройству (*ИСУ*) или приводу, который обеспечивает выполнение данной команды, т.е. изменяет позицию бабки шлифовального круга.

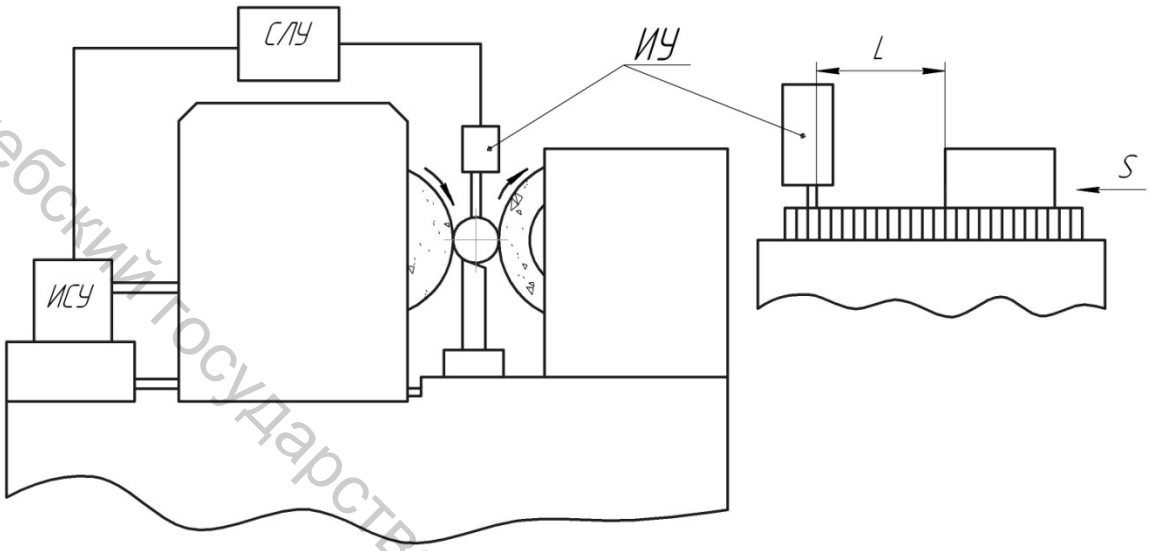


Рисунок 3.129 – Схема односторонней коррекции уровня размерной настройки

На рисунке 3.130 изображена принципиальная схема односторонней коррекции уровня настройки с помощью регулируемого упора. Обработка ведется врезным шлифованием до регулируемого упора 1. Шлифованная заготовка передается в измерительную позицию, где контролируется измерительным устройством. По сигналу *СЛУ* исполнительное устройство изменяет положение упора *1*. Основное преимущество этого способа заключается в том, что малый подналадочный импульс сообщается не массивной бабке, а легкому упору, точность перемещения которого выше точности отработки механизма. *СЛУ* данных систем автоматической коррекции уровня размерной настройки может работать по одному из приведенных ниже алгоритмов.

Коррекция настройки по нескольким (от двух до пяти) последовательно обработанным заготовкам. В данном случае контролируются размеры всех последовательно обработанных заготовок. Корректирующий импульс подается только тогда, когда размеры нескольких последовательных обработанных заготовок превысят контрольную границу. В частном случае корректирующий импульс может подаваться, если размеры только одной заготовки превысят контрольную границу. В данном случае аппаратурно СЛУ является самым простым. Однако возможно запаздывание сигнала на коррекцию, особенно при большой

Витебский государственный технологический университет

скорости изменения уровня центра рассеяния размеров обработанных заготовок, и, следовательно, появление брака.

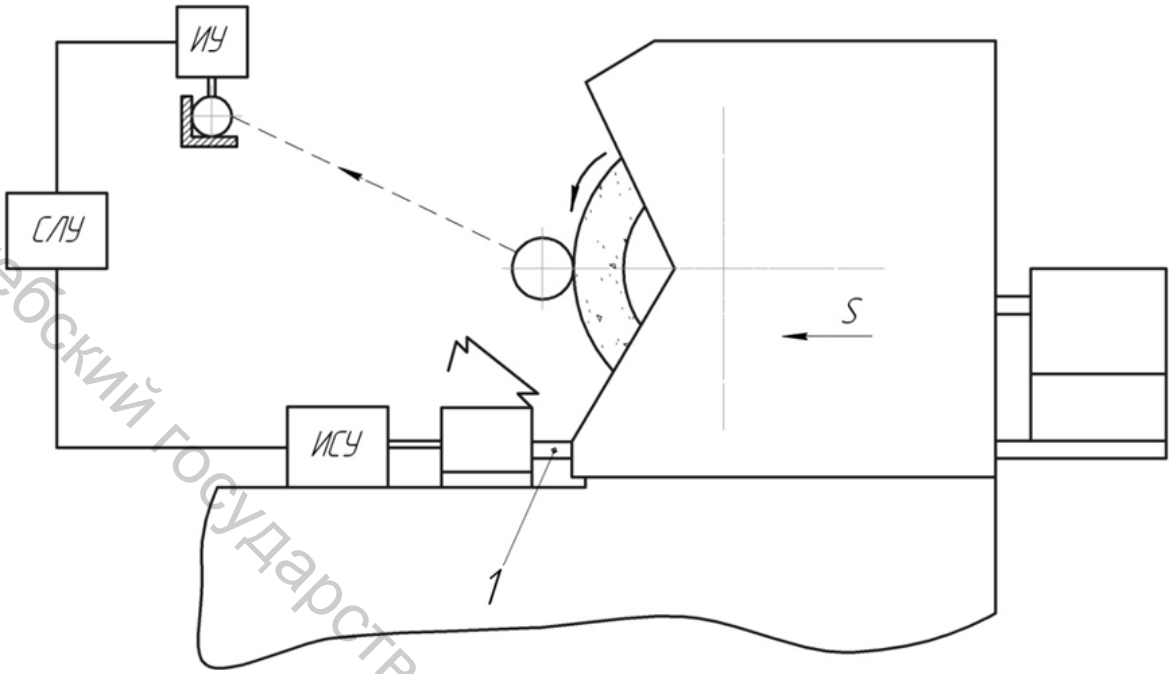


Рисунок 3.130 – Схема односторонней коррекции уровня размерной настройки с помощью регулируемого упора

Коррекция настройки по положению центра группирования. В данном случае *СЛУ* вычисляет среднее значение размера $\overline{A}_{mi}$ в выборке из *m* обработанных заготовок. Когда $\overline{A}_{mi}$ достигает контрольной границы, выдается сигнал на коррекцию размерной настройки. Удобнее всего вести расчет $\overline{A}_{mi}$ по следующей рекуррентной формуле (если *i* > *m)*:

$$\overline{A_{mi}} = \overline{A}_{m,i-1} + \frac{(A_i - A_{i-m})}{m},$$

где *i* – текущий номер обработанной детали с размером A_i. При таком расчете требуемый объем памяти не зависит от размера выборки, так как необходимы элементы для запоминания только четырех величин: $A_{m,i-1}$, A_i, A_{i-m} и *m*.

Чем больше объем выборки, тем точнее оценка $\overline{A}_{mi}$, но увеличивать *m* больше, чем до 7...9, не имеет смысла, так как при этом темп уменьшения доверительного интервала ξ резко замедляется. Доверительный интервал для $\overline{A}_{mi}$ обратно пропорционален $\sqrt{m}$ и при доверительной вероятности 99 %.

Витебский государственный технологический университет

m, шт. …	3	4	5	6	7	8	9	10
ε/σ …	5,72	2,92	2,06	1,65	1,40	1,24	1,12	1,03

Данный способ обеспечивает большую надежность управления, чем предыдущий, но требует более сложного, а следовательно, и более дорогого СЛУ.

Коррекция настройки по скользящей медиане. В данном случае также непрерывно анализируется скользящая выборка из *m* обработанных заготовок, но не производятся расчеты. Сигнал на коррекцию выдается, если m/2 (или больше) заготовок выборки имеют размер, больший установленного контрольной границей. В данном случае грубые погрешности (измерения или обработки) меньше влияют на надежность управления, так как уровни отклонений размеров не имеют значения для выработки сигнала. Важно лишь, чтобы 50 % заготовок выборки имело размер больше граничного, а 50 % – меньше. Коррекция настройки по накопленной медиане. Способ отличается от предыдущего тем, что счет заготовок начинается сразу после выполнения коррекции, а контрольная граница расположена посредине поля допуска. Сигнал о следующей коррекции также поступает, когда 50 % обработанных после предыдущей коррекции заготовок будет иметь размер, больший установленного контрольного, а 50 % – меньший.

Имитационное моделирование различных способов работы *СЛУ* показало, что степень подавления систематической составляющей погрешности зависит не только от способа, но и от выбранного значения корректирующего импульса.

Двусторонняя коррекция размерной настройки применяется в тех случаях, когда при отсутствии существенных доминирующих причин, определяющих одностороннее смещение размеров обработанных заготовок, уровень настройки смещается периодически в одну или другую сторону. Для двусторонней коррекции используются обычно те же способы работы *СЛУ*, что и для односторонней. Но устройства для двусторонней коррекции имеют двойной комплект ряда элементов, так как устанавливаются две контрольные границы. Из перечисленных выше способов работы *СЛУ* в данном случае не годится лишь четвертый (по накопленной медиане). Но его можно условно рассматривать как двусторонний, где две контрольные границы сливаются в одну.

При непрерывном процессе обработки, когда применяется односторонняя коррекция уровня настройки, влияние запаздывания сигнала о коррекции может быть в какой-то степени уменьшено соответствующим расположением контрольной границы. Расстояние от *ИУ* до зоны обработки влияет в противоположных «направлениях». Удаление ИУ от зоны обработки повышает точность и надежность его работы, но при этом увеличивается запаздывание сигнала, что снижает точность кор-

Витебский государственный технологический университет

рекции уровня размерной настройки, особенно при двусторонней коррекции.

Схема автоматического управления точностью обработки при контроле размера в процессе обработки показана на рисунке 3.131 а. Прибор активного контроля (*ПАК*) непрерывно измеряет обрабатываемую врезным шлифованием заготовку. По мере изменения ее фактического размера *СЛУ* и *ИСУ* измеряют скорость поперечной подачи, и при достижении заданного размера подается команда на ускоренный отскок (рис. 3.131 б). Таким образом, рассмотренная схема управления подачей может скомпенсировать действие источников не только систематической, но и случайной погрешности.

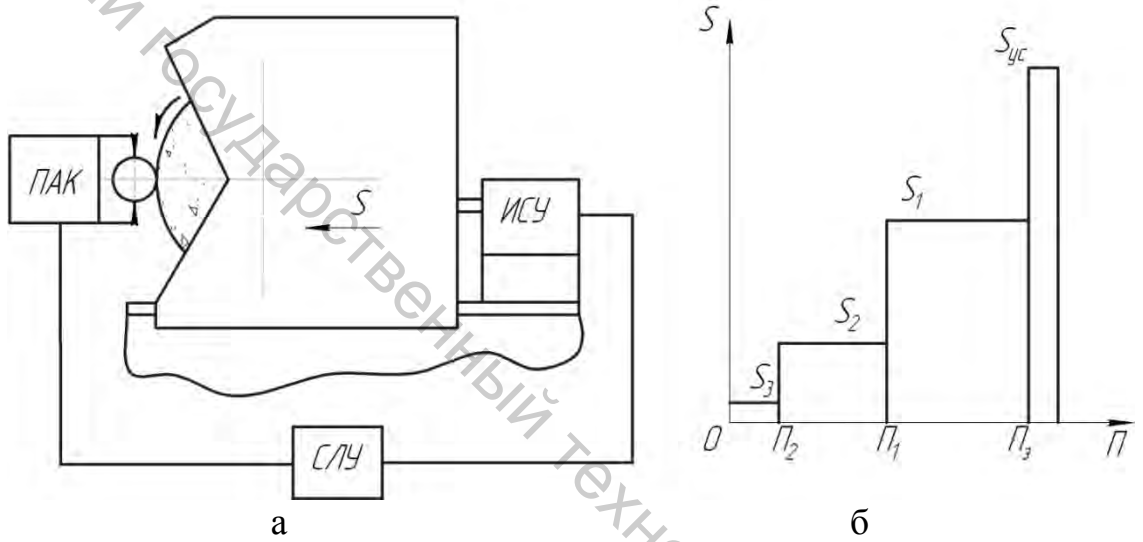


Рисунок 3.131 – Схема автоматического управления точностью при контроле размера в процессе обработки ($S_{ус}$ – подача ускоренного врезания; S_1, S_2 – подачи при предварительной и чистовой обработке; S_3 – микроподача на этапе выхаживания)

В описанном случае новым источником систематической погрешности является износ измерительных наконечников *ПАК*. Чтобы скомпенсировать действие этого нового источника, используют комбинированные системы управления точностью, в которых применяются дополнительные измерительные устройства, измеряющие обработанную заготовку в отдельной рабочей позиции. Их измерительные наконечники изнашиваются значительно медленнее основных, так как работают неполное время обработки и в более благоприятных условиях. Дополнительные *ИУ* дают в *СЛУ* информацию о степени износа основных наконечников, обеспечивая коррекцию их настройки. *ПАК* разработаны и испытаны и для других методов обработки.

Витебский государственный технологический университет

3.12.4 Автоматическое управление точностью обработки по рассогласованию

Рассмотренные средства управления точностью срабатывают, когда контролируемый параметр достигает заданного уровня. Во многих случаях более эффективными являются системы управления, которые приходят в действие при рассогласовании текущего значения контролируемого параметра с заданным его уровнем. Назначение таких систем – уменьшение случайных отклонений размеров, связанных со случайными и систематическими изменениями упругой деформации технологической системы. Поэтому контролируемым параметром в данном случае является либо отклонение упругой деформации от заданного уровня, либо сила резания *Py*, связанная с упругой деформацией функционально.

На рисунке 3.132 показана схема управления точностью обработки на токарном гидрокопировальном полуавтомате путем компенсации изменения упругой деформации технологической системы соответствующим изменением уровня размерной настройки.

Чтобы фактический размер оставался постоянным, необходимо соблюдать равенство $\Delta A_H = -\Delta y$, где ΔA_H – изменение уровня размерной настройки; Δy – изменение упругой деформации. В системе, показанной на рисунке 3.132, измерительное устройство непрерывно определяет уровень радиальной силы *Py*, который косвенно оценивает уровень упругой деформации *y* согласно выражению

$$y = P_y / j,$$

где *j* – жесткость технологической системы. Это значение P_y сравнивается в устройстве сравнения (*СУ*) с заданным значением (уставкой), которое передается в *СУ* задающим устройством (*ЗУ*).

Если полагают, что жесткость можно считать постоянной, то и уставка будет постоянной. Но если обрабатывают маложесткие валы и жесткости передней и задней бабок сильно различаются, то *ЗУ* вырабатывает переменный сигнал, зависящий от координаты *x*. Разность между сигналами ИУ и ЗУ, пропорциональная Δy, поступает в исполнительное устройство, которое перемещает корпус 1 золотника в ту сторону и до тех пор, пока сигнал, выходящий из *СУ*, не станет равным нулю. При перемещении корпуса золотника изменяются размер A_2 и, согласно показанной на рисунке 4.93 размерной цепи, размер $A_{коп}$ на копире. Действительно,

$$A_\Delta = A_{ст} + A_{коп} + A_1 - A_2 - A_3,$$

Витебский государственный технологический университет

где $A_{ст}$, A_1 – постоянные станка; $A_{коп}$ – размер на копире; A_2 , A_3 – размеры цепи в золотнике управления, соответствующие равновесному положению суппорта.

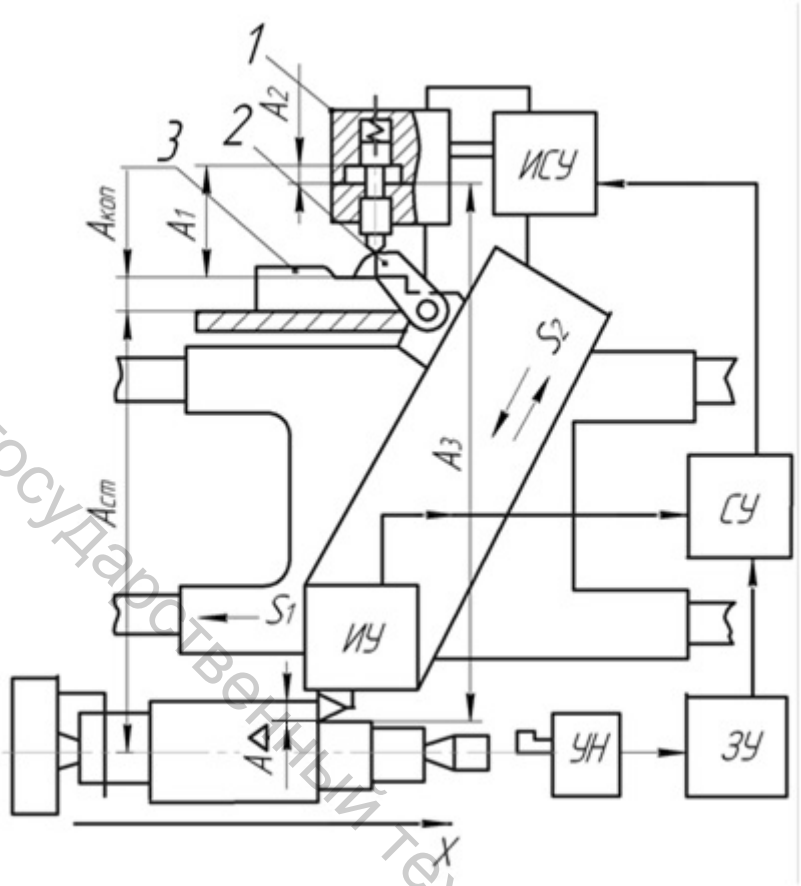


Рисунок 3.132 – Схема управления точностью обработки путем компенсации изменения упругой деформации изменением уровня размерной настройки

Для компенсации размерного износа резца система снабжена устройством установки нуля (*УН*). Перед обработкой каждой заготовки партии резец подводится к измерительному рычагу *УН*. При этом щуп *2* находится на нулевой ступени копира, а собственные сигналы *ИУ* и *ЗУ* равны нулю. Сигнал *УН* об отклонении положения вершины резца от нулевого через *ЗУ* и *СУ* передается в *ИСУ*, которое изменяет положение корпуса *1* золотника до тех пор, пока сигнал *УН* не станет равным нулю.

Стабилизация фактического размера возможна также путем стабилизации уровня упругих деформаций технологической системы при случайных изменениях глубины резания (припуска), твердости заготовки, а также при затуплении резца. Это возможно, если подача будет изменяться так, что

$$yC_p t^x s^y HB^n / j = const .$$

Витебский государственный технологический университет

Схема системы управления точностью обработки на токарном гидрокопировальном полуавтомате путем стабилизации упругой деформации технологической системы показана на рисунке 3.133. В данном случае *ИУ*, *ЗУ* и *СУ* выполняют те же функции, что и в системе, показанной на рисунке 3.132. А *ИСУ* изменяет задающую подачу S_1 так, чтобы вышеуказанное выражение оставалось постоянным.

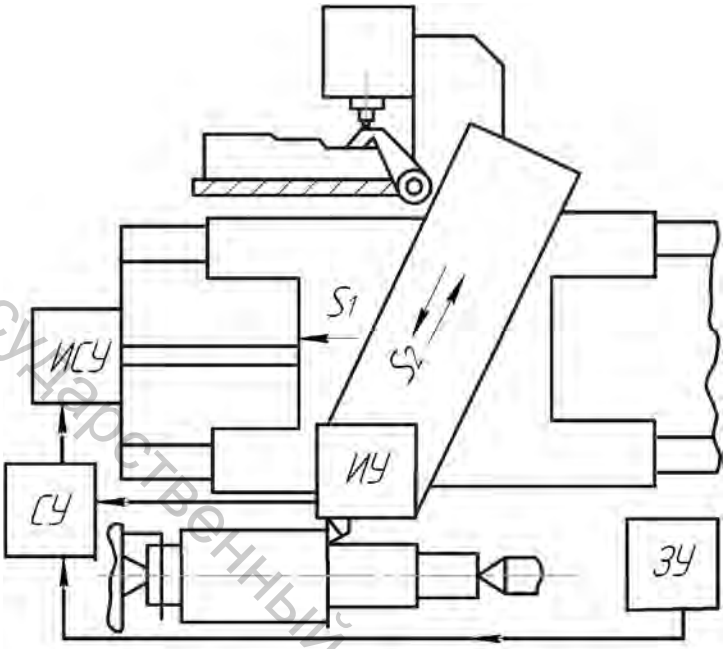


Рисунок 3.133 – Схема управления точностью обработки путем стабилизации упругой деформации

Управление точностью обработки путем компенсации изменений упругой деформации технологической системы изменением размерной настройки позволяет: существенно (в 2...6 раз) сокращать рассеяние размеров, порождаемое случайными факторами, и тем самым повышать точность размеров и формы обработанных заготовок; сохранять шероховатость обработанных поверхностей такой же, как при обычной обработке; увеличивать производительность оборудования за счет обработки за меньшее число проходов; повышать производительность на следующих операциях технологического процесса обработки за счет увеличения точности межоперационных размеров. Недостатком данного способа управления является относительная трудность в создании механизмов малых плавных перемещений, работающих с точностью до нескольких микрометров.

Указанного недостатка лишена система управления путем стабилизации упругих деформаций. Однако из-за изменения подачи обработанные заготовки имеют разную шероховатость. Наилучшими свойствами обладают комбинированные системы управления точностью, которые в заданном диапазоне подач (S_{min} ... S_{max}) стабилизируют упругую

Витебский государственный технологический университет

деформацию, а при $S > S_{max}$ компенсируют изменения упругой деформации изменением размерной настройки.

В настоящее время прошли лабораторные испытания системы управления точностью обработки на токарных, фрезерных, расточных, кругло- и внутришлифовальных, шлицешлифовальных, отрезных и других станках. При этом принципиальная схема управления осталась той же. Различие только в способах получения информации об упругих деформациях технологической системы и способах изменения уровня размерной настройки или стабилизации упругих деформаций. Так, в некоторых случаях вместо силы P_y измеряется мощность привода главного движения, а для стабилизации упругих перемещений изменяется угол резания путем поворота резца вокруг горизонтальной оси, проходящей через его вершину.

3.13 Обеспечение точностных характеристик при формировании соединений

Схемы установки изделий при узловой и общей сборке выбирают для обеспечения заданной точности сборки, удобства ее выполнения сборщиками, упрощения конструкции приспособлений, оборудования и транспортных средств, а также надежной собираемости деталей. Последнее важно в условиях механизированной и автоматизированной сборки. В зависимости от точности ориентации базовой детали и постоянства ее технологических баз различают следующие основные случаи установки [96–97]:

– неточная (неполная) ориентация базовой детали, которая позволяет с одной установки выполнять все переходы сборки изделия (сборочной единицы); случай характерен для ручной сборки, когда достаточно обеспечить неподвижность базовой детали, удобство подвода присоединяемых деталей и сборочных приспособлений и инструментов с разных (необходимых) сторон;

– неточная ориентация базовой детали с необходимостью последовательной смены ее технологических баз; и этот вариант применяется при ручной сборке в случаях, когда конструкция изделия (сборочной единицы) не позволяет выполнять всю сборку с одной установки;

– точная ориентация базовой детали на единый для всего процесса сборки комплект баз (обязательно обработанных поверхностей); данный вариант характерен для механизированной и автоматизированной сборки, а также для ручной сборки в приспособлениях для точной относительной ориентации сопрягаемых деталей;

– то же, что и в предыдущем пункте, но с последовательной сменой технологических баз.

Витебский государственный технологический университет

Для осуществления соединений необходима также ориентация комплектующих (присоединяемых) и соединительных деталей, *обеспечивающее условие собираемости*, т.е. максимально допустимые значения отклонений относительного положения сопрягаемых поверхностей собираемых деталей. На условие собираемости деталей влияют не только допустимое смещение и перекос осей сопрягаемых поверхностей, но и поведение собираемых деталей в процессе сопряжения, например необходимость смещения и поворота одной из сопрягаемых деталей в пределах погрешности их относительного расположения. В сборочных устройствах подобные смещения (компенсация) происходят за счет податливости исполнительного элемента устройства или зазоров.

На условия собираемости двух деталей, сопрягаемых по цилиндрическим, резьбовым, плоским и другим поверхностям, оказывают влияние фаски на их заходных участках, выполняющие роль подвижных компенсаторов. Силы тяжести или силы, прилагаемые при сборке, вызывают на фасках заходных участков реакции, которые обеспечивают компенсирующие смещения одной из сопрягаемых деталей.

Основными факторами, влияющими на точность совпадения осей сопрягаемых поверхностей, являются, как правило, погрешности диаметральных размеров, геометрической формы сопрягаемых поверхностей и баз (изогнутость, овальность, конусность и т.д.), относительного расположения сопрягаемых поверхностей и баз (неперпендикулярность, несоосность и т.д.).

В каждой схеме базирования каждый из перечисленных факторов влияет на точность положения по-разному.

Процесс сопряжения оси и втулки, показанных на рисунке 3.134, осуществляется в три стадии. На первой стадии (рис. 3.134 а) происходит скольжение по образующей втулки-питателя или плоскостям призмы до момента соприкосновения с фаской сопрягаемого вала. Если при этом ось втулки находится ниже оси вала, то в этот момент не произойдет заклинивания, а сила *P*, приложенная к торцу втулки, вызовет на фаске реакцию *R*, которая заставит втулку скользить по фаске, одновременно отрываясь от призмы. При этом происходит смена баз: базирующие точки *1...3* перейдут на торец втулки, а точка *4* – в место контакта кромки втулки с фаской вала (рис. 3.134 б). Вторая стадия продолжается до тех пор, пока не совпадут контуры валика и отверстия втулки (рис. 3.134 в). Совмещение контуров определяет начало третьей стадии, т.е. непосредственного сопряжения (рис. 3.134 г).

Витебский государственный технологический университет

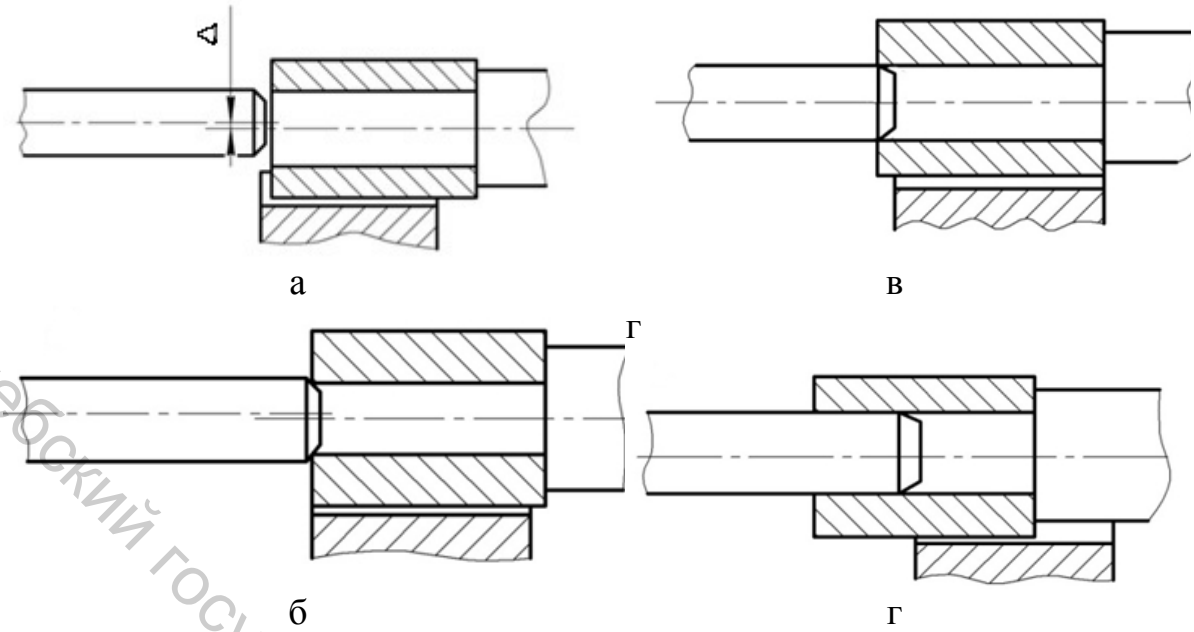


Рисунок 3.134 – Схема процесса смены баз при сопряжении по цилиндрическим поверхностям

При сборке с сопряжением по цилиндрическим поверхностям с обеспечением точности положения собираемых деталей вдоль оси сопрягаемых поверхностей возможны два случая: вал (или втулка) устанавливается до упора в его торец; вал (или втулка) устанавливается вдоль оси с точностью, которая обеспечивается сборочным приспособлением (рис. 3.135). Первый вариант (рис. 3.135 а) является неудачным, так как при такой схеме базирования точность выдерживаемого размера A_Δ будет зависеть от погрешностей размеров корпуса *1* (A_1, A_2) и втулки *2* (A_3) , т.е. погрешность схемы базирования $\Delta_6(A_\Delta)$ в данном случае будет определяться выражением:

$$\Delta_6(A_\Delta) = TA_1 + TA_2 + TA_3,$$

где *TA* – допуск на соответствующий (A_i) размер. Кроме того, будет иметь место систематическая погрешность, обусловленная точностью изготовления детали *3* приспособления по настроечному размеру $A_н$.

При втором варианте (рис. 3.135 б) погрешность схемы базирования по A_Δ равна нулю. Имеет место только систематическая погрешность, обусловленная точностью изготовления пуансона *4* по размеру $A_н$.

Не всегда имеется возможность непосредственного использования схемы базирования, при которой необходимые сборочные базы совпадают с сопрягаемыми поверхностями (или измерительными базами), как это имело место в случае, показанном на рисунке 3.135 б.

Витебский государственный технологический университет

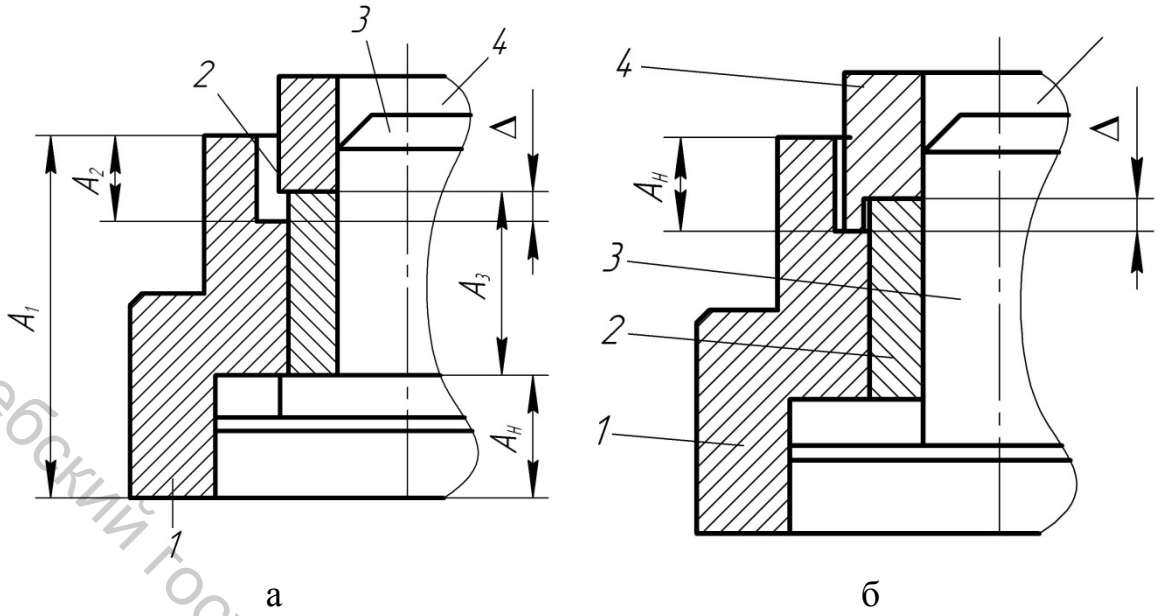


Рисунок 3.135 – Варианты схем базирования в приспособлениях для сборки втулки с корпусом при необходимости выдерживания размера А

Тогда можно применить принцип смены баз в процессе базирования и подвижных компенсаторов. Пример такого решения задачи показан на рисунке 3.136. Для запрессовки подшипников и упорных пружинных колец в отверстие проушины вилки карданного шарнира необходимо обеспечить его точное положение по высоте (несмотря на колебания размера A_3) и углу поворота относительно вертикальной оси.

На первом этапе базирования осуществляется приблизительное ориентирование с помощью опорных точек на торце (*5′*) и проушине (*6′*). Это приближенное базирование дает возможность вилке кардана перемещаться в пределах, необходимых для ввода оправки *1* в отверстия проушины. При этом происходит смена баз, которые переходят в указанные отверстия проушины (точки *5* и *6*). Затем с помощью компенсатора *2* ликвидируется зазор с торцом вилки, а сила *P* сохраняет определенность базирования после удаления оправки *1* и при запрессовке. Последнюю удобнее проводить в другой позиции сборочной машины.

Проектирование (выбор) *сборочного приспособления* на предварительном этапе необходимо осуществлять в следующем порядке.

Проводится проверка технических требований к собираемой сборочной единице. При этом проверяется правильность простановки размеров, требований к относительному положению поверхностей и допусков. При необходимости вносятся согласованные с конструктором коррективы. Определяются условия собираемости, которые выражаются зависимостями:

Витебский государственный технологический университет

$$\sum \Delta_i \le \Delta_{\text{E}} \; ; \; \sum \alpha_j \le \alpha_{\text{E}} \; ,$$

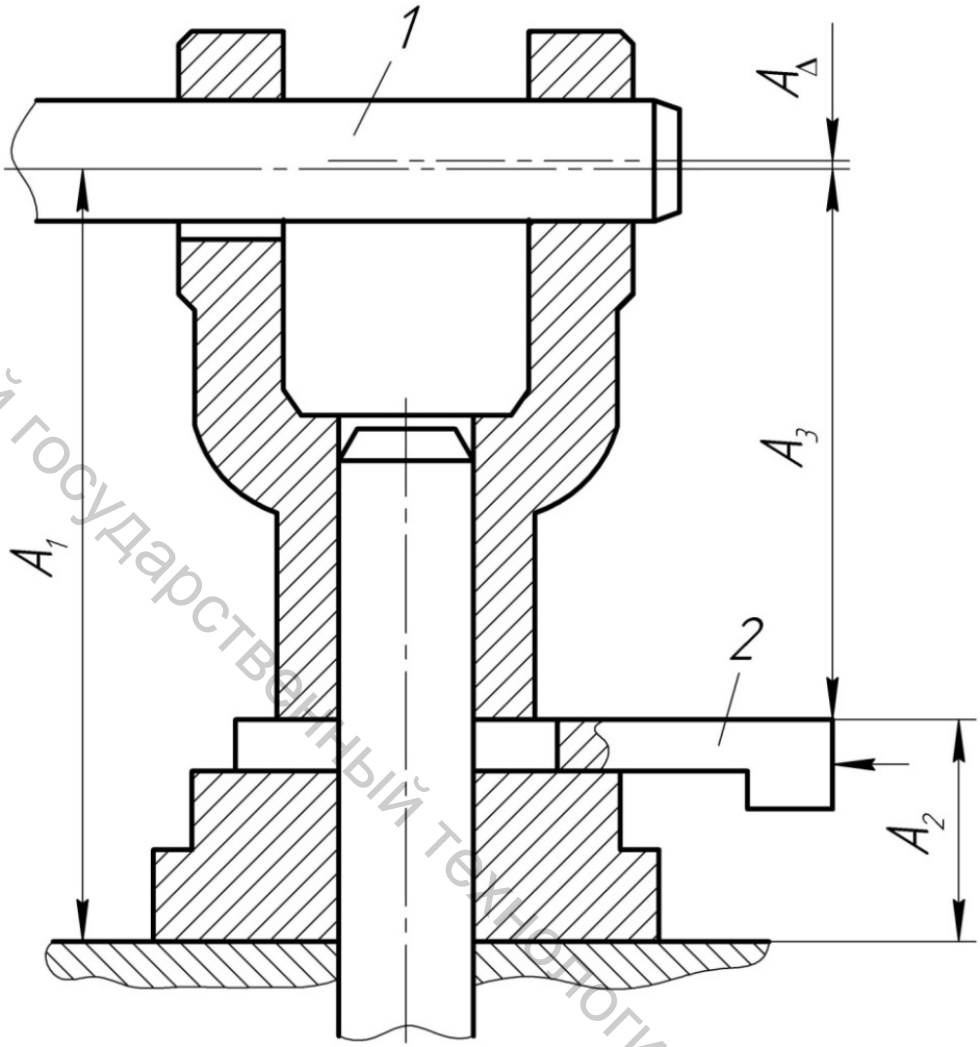


Рисунок 3.136 – Схема базирования вилки кардана для сборки с крестовиной и подшипниками

где Δ_i – допуск на i-й размер размерной цепи схемы базирования; Δ_{E} – допустимое по условию собираемости смещение; α_j – допуск на j-й относительный поворот размерной цепи схемы базирования; α_E – допустимый по условию собираемости относительный поворот.

Условие собираемости рассматривается для начального этапа процесса сопряжения (см. рис. 3.137). Значения Δ_{E} и α_E определяются теоретически (для относительно простых случаев) или экспериментально. Согласно рисунку 3.137 а, допустимое смещение осей при $D > d$

$$\Delta_{\text{E}} = C_{\text{A}} + C_B + (D - d)/2 \, ,$$

где C_A, C_B – размеры фасок соответственно отверстия и вала.

Витебский государственный технологический университет

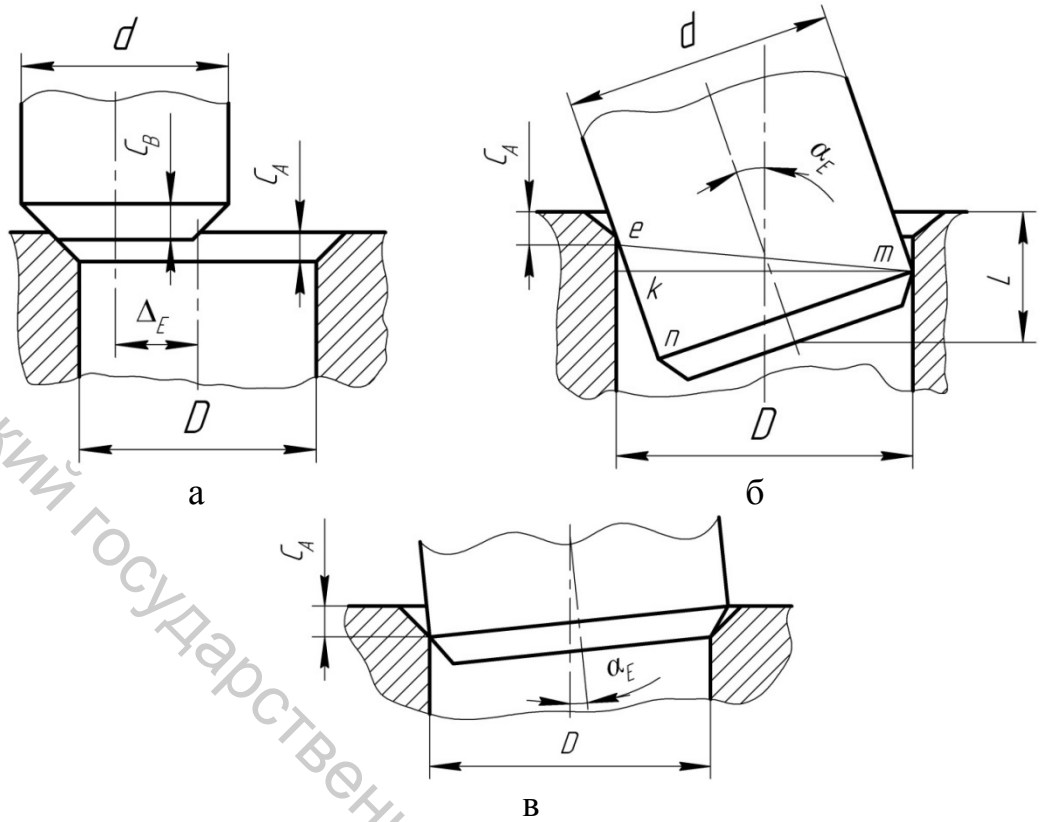


Рисунок 3.137 – Схемы оценки условий собираемости по цилиндрическим поверхностям

Из треугольников *ект* и *епт* (рис. 3.137 б) при $D > d$ после упрощения получаем:

$$\alpha_{\text{E}} = \text{arctg}((D - d)/(L - C_{\text{A}})),$$

где L – требуемая глубина свободного ввода.

Для деталей, сопрягаемых по цилиндрическим поверхностям с гарантированным натягом ($D < d$), значение α_{E} ограничивают размерами фаски, чтобы при приложении силы их не заклинило. Тогда (рис. 3.137 в)

$$\alpha_{\text{E}} = \arcsin(C_{\text{B}}/D)$$

или

$$\alpha_{\text{E}} = \arcsin(C_{\text{A}}/D)\ .$$

Согласно рисунку 3.138 а, параметр собираемости Δ_{E} можно определить выражением

Витебский государственный технологический университет

$$\Delta_{\text{E}} = b/3,$$

где b – ширина шпонки, радиус округления которой, равный $b/2$, работает при сопряжении как фаска. Тогда допустимая погрешность угла поворота вала φ_E в начале сопряжения определяется выражением:

$$\varphi_{\text{E}} = \arcsin(2\Delta_{\text{E}}/d).$$

Согласно рисунку 3.138 б, допустимый угол перекоса шпонки (или паза) α_{E} можно определить следующим образом:

$$\alpha_{\text{E}} = \arcsin((B-b)/(L-b)).$$

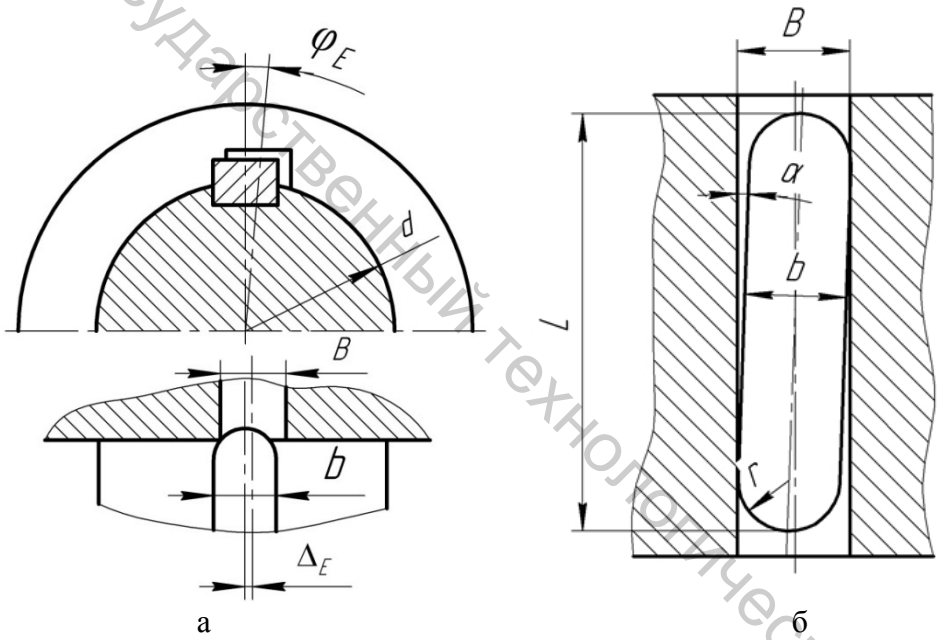


Рисунок 3.138 – Схемы оценки условий собираемости шпоночного соединения

Если найденные значения параметров условия собираемости ставят слишком жесткие требования по точности, то приходится повторно пересматривать технические требования к объекту сборки и составляющим его деталям.

3.14 Вопросы для самоконтроля

1. Что в машиностроении понимают под точностью?

Витебский государственный технологический университет

2. Определите понятия функциональных и технологических допусков.

3. В чем особенность технологических допусков при механической обработке и сборке?

4. Перечислите основные положения ГОСТ 21495-77 «Базирование и базы в машиностроении. Термины и определения».

5. Охарактеризуйте современное состояние развития теории базирования.

6. В чем суть предложений по корректировке положений теории базирования современными исследователями?

7. Как определяют понятия погрешности базирования и установки современные исследователи?

8. Какие недостатки имеет ГОСТ 21495-77 «Базирование и базы в машиностроении. Термины и определения»?

9. В чем разница между проектным и реальным базированием?

10. Дайте определение понятию «реальное базирование заготовки при обработке на станке».

11. Дайте определение понятию «реальное базирование при сборочных операциях».

12. Дайте определение понятию «реальное базирование для контрольных приспособлений».

13. Как классифицируются базы по назначению?

14. Дайте определение понятию «Конструкторские базы».

15. Дайте определение понятию «Технологические базы».

16. Как различаются базы по проявлению?

17. Дайте определение понятию «Измерительные базы».

18. Назовите методы реального базирования.

19. Что выверяется при базировании выверкой по реальной технологической базе?

20. Когда применяется базирование по разметке?

21. С помощью чего осуществляется контроль положения линий разметки при базировании по разметке?

22. С помощью чего осуществляется регулировка положения заготовки при базировании по разметке?

23. Укажите достоинства и недостатки базирования по разметке.

24. Укажите достоинства и недостатки базирования выверкой.

25. Укажите достоинства и недостатки базирования сопряжением.

26. Назовите цель проектного базирования.

27. Как определяется конструкторская база при проектном базировании?

28. Дайте определение понятию «геометрическая модель объекта производства».

29. Дайте определение понятию «проектная технологическая база».

Витебский государственный технологический университет

30. Чем реальная технологическая база отличается от проектной технологической базы?

31. Дайте определение понятию «комплект технологических баз».

32. Перечислите известные Вам комплекты технологических баз ориентации.

33. Как должно задаваться относительное угловое положение оси поверхности вращения на чертеже детали или оси обрабатываемой поверхности заготовки на операционном эскизе?

34. Как должно задаваться относительное угловое положение плоской поверхности на чертеже детали или оси обрабатываемой поверхности заготовки на операционном эскизе?

35. Какие базы называются явными?

36. Какие базы называются скрытыми?

37. Как осуществляется создание собственной системы координат при проектном базировании?

38. Что определяет вид компонента комплекта баз?

39. Как определяются неуказанные допуски взаимного расположения?

40. Дайте определение понятию «теоретическая схема базирования».

41. Дайте определение понятию «установочная (тройная однонаправленная) технологическая база».

42. Сколько и каких связей накладывает установочная (тройная однонаправленная) технологическая база?

43. С помощью чего может быть реализована установочная (тройная однонаправленная) технологическая база?

44. Дайте определение понятию «направляющая (двойная однонаправленная) технологическая база».

45. Сколько и каких связей накладывает направляющая (двойная однонаправленная) технологическая база?

46. С помощью чего может быть реализована направляющая (двойная однонаправленная) технологическая база?

47. Дайте определение понятию «опорная (одиночная) технологическая база».

48. Сколько и каких связей накладывает опорная (одиночная) технологическая база?

49. С помощью чего может быть реализована опорная (одиночная) технологическая база?

50. Дайте определение понятию «двойная опорная (двойная разнонаправленная) технологическая база».

51. Сколько и каких связей накладывает двойная опорная (двойная разнонаправленная) технологическая база?

52. С помощью чего может быть реализована двойная опорная (двойная разнонаправленная) технологическая база?

Витебский государственный технологический университет

53. Дайте определение понятию «двойная направляющая (четверная) технологическая база».

54. Сколько и каких связей накладывает двойная направляющая (четверная) технологическая база?

55. С помощью чего может быть реализована двойная направляющая (четверная) технологическая база?

56. Дайте определение понятию «тройная опорная (тройная разнонаправленная) технологическая база».

57. Сколько и каких связей накладывает тройная опорная (тройная разнонаправленная) технологическая база?

58. С помощью чего может быть реализована тройная опорная (тройная разнонаправленная) технологическая база?

59. Перечислите комплекты технологических баз в зависимости от вида компонента.

60. С какими базами может сочетаться в комплект установочная (тройная однонаправленная) база?

61. С какими базами может сочетаться в комплект двойная направляющая (четверная) база?

62. С какими базами может сочетаться в комплект тройная опорная (тройная разнонаправленная) база?

63. С какими базами может сочетаться в комплект направляющая (двойная однонаправленная) база?

64. С какими базами может сочетаться в комплект двойная опорная (двойная разнонаправленная) база?

65. На какие классы можно разделить варианты схем базирования в зависимости от «главной» базы?

66. Дайте определение понятию «теоретическая схема установки».

67. Изобразите условные обозначения опор, оправок, патронов на схеме установки.

68. Перечислите этапы разработки модели установки заготовки.

69. Дайте определение понятию размерная настройка.

70. Изобразите схему размерной настройки.

71. Назовите методы размерной настройки.

72. Укажите недостатки размерной настройки по эталону.

73. Укажите недостатки размерной настройки методом пробной стружки.

74. Укажите цели размерной настройки на партию.

75. Назовите этапы (процедуры) размерной настройки на партию.

76. Дайте определение понятию «поле рассеяния размеров».

77. Дайте определение понятию «доверительный интервал для выборочного среднего».

78. Дайте определение понятию «оптимальная точность размерной настройки».

79. От чего зависит оптимальная точность размерной настройки?

Витебский государственный технологический университет

80. Дайте определение понятию «размерная цепь».

81. Дайте определение понятию «сборочная размерная цепь».

82. Дайте определение понятию «линейная размерная цепь».

83. Дайте определение понятию «плоская размерная цепь».

84. Дайте определение понятию «пространственная размерная цепь».

85. Дайте определение понятию «технологическая размерная цепь».

86. Назовите методы обеспечения точности замыкающего звена размерной цепи.

87. Опишите методы полной и неполной взаимозаменяемости.

88. Опишите метод групповой взаимозаменяемости.

89. Приведите алгоритм графического метода сортировки деталей при групповой взаимозаменяемости.

90. Опишите метод подбора.

91. Опишите метод пригонки.

92. Какую информацию содержит типовая схема обработки деталей?

93. Что является исходными данными для проектирования технологического процесса?

94. Как производится проверка правильности простановки размерных связей на чертеже детали?

95. Назовите правила проверки правильности простановки линейных размеров с помощью графа размерных связей.

96. Приведите алгоритм проверки правильности простановки линейных размеров с помощью матрицы смежности.

97. Дайте определение понятию «граф угловых связей».

98. Опишите способы обеспечения точности взаимного расположения поверхностей.

99. Опишите алгоритм определения порядка обработки и смены баз.

100. Как строятся графы размерных связей заготовки для этапов типовой схемы?

101. Как формируются «отсеченные» графы размерных связей?

102. Как проводится анализ возможности совмещения и последовательности выполнения переходов технологической операции?

103. Опишите постулаты и правила синтеза схем базирования.

104. Опишите алгоритм синтеза схемы установки.

105. Какие задачи решаются с помощью размерного анализа ТП?

106. Дайте определение понятиям «припуск» и «напуск».

107. Какие методы используются для определения припусков?

108. Дайте определение понятиям «операционный и общий припуск».

109. Опишите алгоритм расчета односторонних припусков.

Витебский государственный технологический университет

110. Опишите алгоритм расчета припусков при обработке параллельных плоскостей.

111. Как определить значение минимального припуска?

112. Дайте определение понятию «размерная схема ТП».

113. Опишите правила построения исходного и производного графов ТП.

114. Опишите правила построения уравнений размерных связей ТП.

115. Как проверить, что разработанный ТП обеспечивает заданную чертежом точность?

116. Каковы алгоритмы расчета технологических размеров, припусков и размеров заготовки?

117. Дайте определение понятию «жесткость машин и технологических систем механической обработки».

118. Дайте определение понятию «динамическая жесткость».

119. Дайте определение понятию «коэффициент динамичности».

120. Опишите производственный метод определения жесткости токарного станка.

121. Опишите производственный метод определения жесткости плоскошлифовального станка.

122. Опишите классификацию погрешностей сборки и механической обработки.

123. Приведите пример погрешностей, не зависящих от режима резания.

124. Как определяются погрешности схемы установки при несовпадении опорных точек с точками сопряжения?

125. Как определяются погрешности схемы установки при установке заготовки в призму?

126. Как определяются погрешности схемы установки при установке заготовки на пальцы?

127. Как определяются погрешности, вызванные деформациями от сил закрепления?

128. Приведите пример погрешностей, зависящих от режима резания.

129. Дайте определение понятию «коэффициент наследования погрешности».

130. Дайте определение понятию «коэффициент уточнения».

131. Приведите пример прочих погрешностей при механической обработке.

132. Назовите характеристики точности и стабильности технологического перехода.

133. Как осуществляется статистическое регулирование точности обработки?

Витебский государственный технологический университет

134. Как осуществляется автоматическое управление точностью обработки по выходным данным?

135. Как осуществляется односторонняя коррекция уровня размерной настройки?

136. Как осуществляется автоматическое управление точностью при использовании приборов активного контроля?

137. Как осуществляется автоматическое управление точностью обработки по рассогласованию?

138. Приведите положения по обеспечению точности при формировании соединений.

139. Как определяются условия собираемости для начального этапа процесса сопряжения?

Витебский государственный технологический университет

4 ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

4.1 Механизмы формирования показателей качества поверхностей деталей машин

Как уже было отмечено ранее, остаточные напряжения возникают на всех этапах технологического процесса – от заготовительного до отделочного. При воздействии режущего клина *К* (рис. 4.1) на заготовку в ее подповерхностном слое протекает процесс неравномерного пластического деформирования. В зоне *I* стружкообразование происходит в условиях интенсивных нормальных сжимающих (-) напряжений, которые проникают под поверхность резания и уравновешиваются упругими растягивающими (+) напряжениями во внутренних слоях заготовки. В зоне *II* силы трения о заданную поверхность режущего клина вызывают пластическое растяжение в тонком слое под поверхностью резания. После выхода из зоны резания напряжения в пластически деформированном подповерхностном слое (зоны *III* и *IV*) изменяют знак [2–5, 97–101].

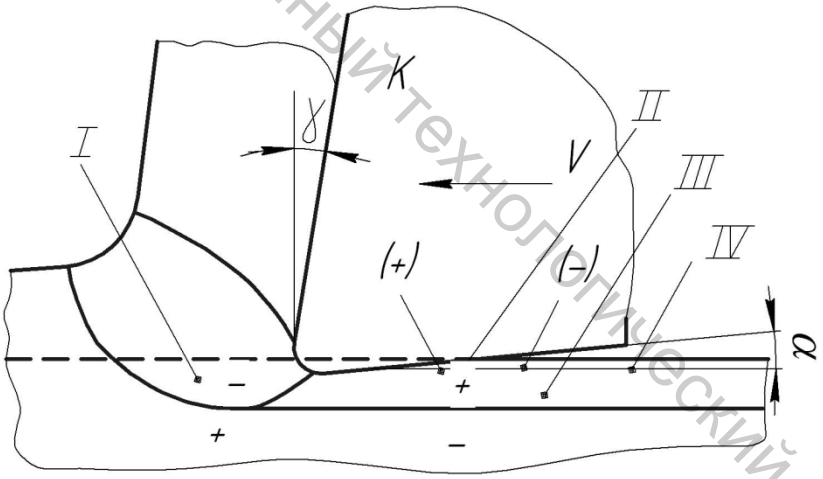


Рисунок 4.1 – Схема зон пластического деформирования и напряжений при резании лезвийным инструментом

В пластически деформированном подповерхностном слое снижается (на 0,3...0,8 %) плотность материала, повышаются его твердость и хрупкость, уменьшаются пластичность и вязкость, изменяются магнитные и некоторые другие свойства. Упрочнение (наклеп) материала подповерхностного слоя зависит от степени его пластической деформации.

Выделяющаяся в зоне резания теплота нагревает тонкий подповерхностный слой до высоких температур, что вызывает увеличение его удельного объема. Однако уровень напряжений в разогретом слое низок в связи со значительным снижением модуля упругости и повышением

Витебский государственный технологический университет

пластичности. После прекращения воздействия режущего клина происходит быстрое охлаждение металла подповерхностного слоя, сопровождающееся его сжатием, чему препятствуют нижележащие слои металла, оставшиеся холодными. В результате в нагретом подповерхностном слое развиваются остаточные напряжения растяжения, а в нижележащих слоях – уравновешивающие их напряжения сжатия.

С другой стороны, повышение температуры в зоне резания и подповерхностном слое ведет к уменьшению упрочнения. Чем выше температура нагрева и больше продолжительность теплового воздействия, тем значительнее понижается уровень упрочнения.

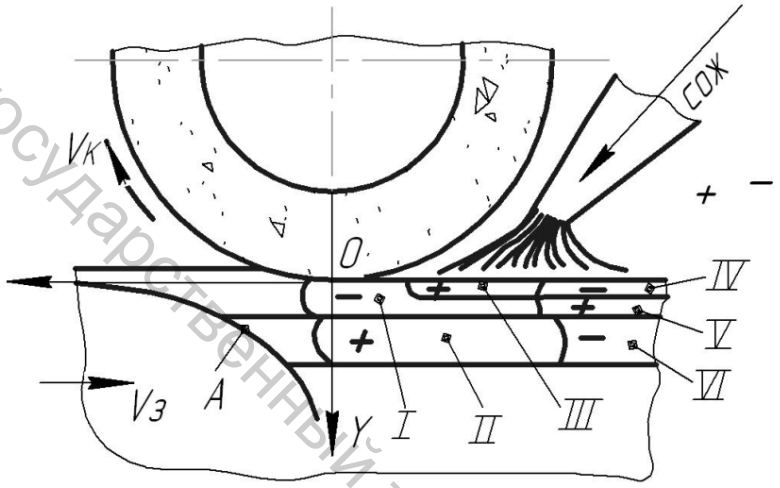


Рисунок 4.2 – Схема формирования остаточных напряжений в подповерхностном слое при шлифовании

На рисунке 4.2 показана схема формирования остаточных напряжений в подповерхностном слое при шлифовании, когда главное влияние на их уровень и характер изменения оказывает нестационарное и неравномерное температурное поле. В момент максимального нагрева это поле характеризуется кривой *А*. Поле вызывает в зоне *I* сжимающие напряжения в связи с тем, что нижележащий слой заготовки (зона *II*) препятствует ее термическому расширению. Эти напряжения обычно превышают предел текучести шлифуемого материала (при высокой температуре), что приводит к пластическим деформациям сжатия в зоне *I*. Естественно, в зоне *II* возникают временные растягивающие напряжения.

После выхода из зоны шлифования обрабатываемая поверхность под действием СОЖ резко охлаждается, вследствие чего образуется зона *III*, в которой формируются временные растягивающие напряжения. Часто и они превышают предел текучести шлифуемого материала. По мере удаления от зоны шлифования температура в подповерхностном слое выравнивается, что в связи с пластической деформацией в зонах *I* и

Витебский государственный технологический университет

III приводит к изменению знака временных напряжений (зоны *IV*, *V* и *VI*) и формированию таким образом остаточных напряжений.

При шлифовании закаленных сталей уровень остаточных напряжений и характер их изменения по глубине подповерхностного слоя существенно зависят от структурных превращений в материале под действием кратковременных тепловых импульсов. Эти структурные изменения принято называть *прижогами*. В зависимости от внешнего вида прижоги бывают: сплошные – вся поверхность покрыта прижогом; пятнистые – на шлифованной поверхности имеются отдельные пятна прижогов; однородные штриховые – вся шлифованная поверхность покрыта однородными штриховыми прижогами; циклические штриховые – штриховые прижоги циклически повторяются на шлифованной детали.

По характеру изменения микроструктуры подповерхностного слоя различают: прижоги отпуска – в подповерхностном слое в местах прижога имеются только структуры отпуска (сорбит или троостит, сорбито-троостит или троостито-мартенсит); прижоги вторичной закалки с отпуском – в подповерхностном слое шлифованной детали в местах прижога тонкий слой вторичной закалки расположен на более мягкой основе отпущенного слоя. Структура слоя вторичной закалки может содержать мартенсит или аустенит (для легированных сталей).

Изменение структуры подповерхностного слоя ведет к изменению удельной плотности материала в нем и, следовательно, к появлению собственной схемы распределения остаточных напряжений, которые складываются с полученными под воздействием «теплового удара». В зависимости от сочетания методов и режимов обработки в подповерхностном слое обработанной заготовки образуются остаточные напряжения с различными законами изменения по глубине.

4.2 Влияние способов и условий обработки на шероховатость поверхности

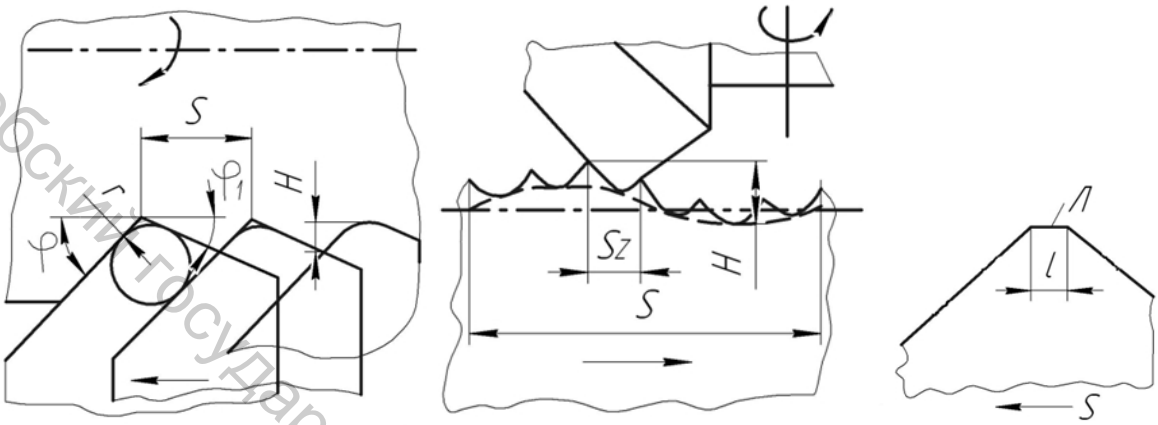
Все многообразные причины, обусловливающие шероховатость обработанной поверхности, можно объединить в три основные группы: причины, связанные с геометрией процесса резания; причины, связанные с пластической деформацией обрабатываемого материала; вибрации инструмента относительно обрабатываемой поверхности [2–5, 97–101].

С геометрической точки зрения высота, форма и относительное расположение неровностей (направления обработанных рисок) определяются формой и состоянием формообразующих элементов инструмен-

Витебский государственный технологический университет

та и теми элементами режима обработки, которые влияют на изменение траектории его движения относительно заготовки.

На рисунке 4.3 показаны схемы формирования «геометрической» шероховатости. При точении резец описывает относительно оси вращения заготовки винтовую линию с шагом, равным подаче S.



а б в

Рисунок 4.3 – Формирование «геометрической» шероховатости: а – при точении, б – торцовом фрезеровании, в – резец с дополнительным режуще-защищающим лезвием

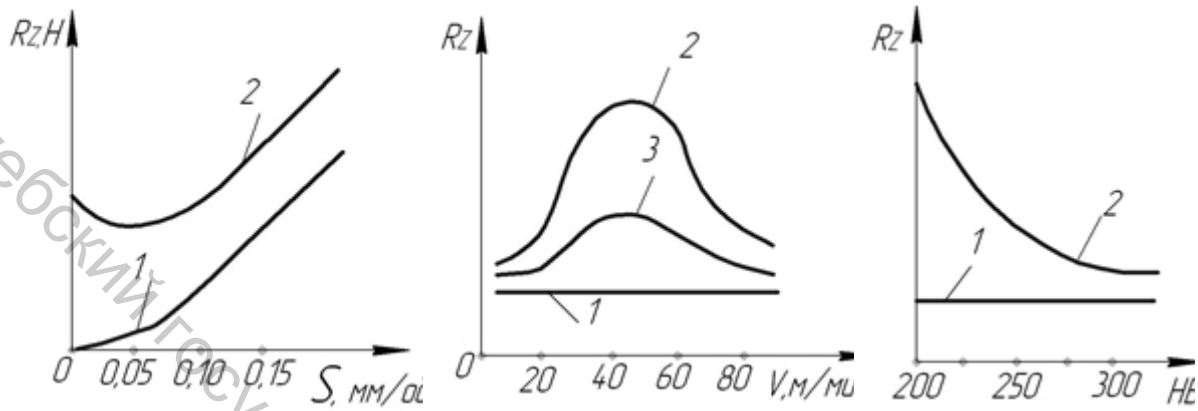
В осевом сечении обработанной поверхности образуются гребешки (рис. 4.3 а), высота которых зависит от подачи *s*, углов в плане φ_1 и φ, радиуса *r* скругления режущей кромки. При достаточно малой подаче высота *H* зависит уже только от *r* и *s*. Зависимость «геометрической» шероховатости высотой *H* от подачи *s* отражает кривая 1 на рисунке 4.4 а.

При торцовом фрезеровании *H* зависит не только от подачи на зуб *Sz*, но и от торцового биения режущих кромок (рис. 4.3 б). В данном случае «геометрические» гребешки касаются не прямой линии, а синусоиды с шагом $S = S_z z$, где *z* – число зубьев фрезы. Из-за неравномерного положения вершин резцов фрезы опорная кривая получается сложнее.

При обработке резанием в подповерхностном слое протекают два процесса – пластическое деформирование и упругое восстановление (зоны I и II на рисунке 4.1). Эти процессы приводят к увеличению шероховатости по сравнению с *H*, что иллюстрируется экспериментальными графиками на рисунке 4.4, где линии 1-3 отражают зависимость *H* от рассматриваемого фактора. Эксперименты показали, что уменьшение подачи от 0,1 до 0,02 мм/об при точении конструкционных сталей практически не влияет на *Rz* (рис. 4.4 а, кривая 2). Неровности обработанной поверхности в этом случае образуются не столько под влиянием гео-

Витебский государственный технологический университет

метрических причин, сколько в результате пластических и упругих деформаций. При очень малых подачах *Rz* может даже увеличиваться вследствие потери устойчивости движения суппорта, который начинает перемещаться не плавно, а рывками.



а б в

Рисунок 4.4 – Влияние скоростей резания, подач и твердости заготовки на высоту неровностей обработанной поверхности

Существенное влияние на пластические деформации в подповерхностном слое оказывает скорость резания. Кроме того, она обусловливает процесс образования нароста, который значительно повышает уровень Rz. В зависимости от значения подачи и пластических свойств заготовки максимальная высота нароста приходится на скорость в диапазоне от 20 до 40 м/мин, что отражается на значении *Rz* (кривая 2 на рисунке 4.4 б). Применение охлаждения сульфофрезолом снижает значение *Rz* но при этом сохраняется характер зависимости *Rz* от скорости резания (кривая 3 на рисунке 4.4 б). При увеличении скорости резания сверх определенного граничного значения *Rz* перестает изменяться. Граничная скорость $\upsilon_{гр}$ резания зависит от подачи. Например, для конструкционных сталей присущи такие соотношения *S* и $\upsilon_{гр}$:

S, мм/об	0,1	0,2	0,3	0,4
$\upsilon_{гр}$, м/мин	190	145	105	92

Увеличение твердости заготовки ведет к уменьшению ее пластичности и, следовательно, к уменьшению уровня пластических деформаций в подповерхностном слое. Поэтому, как показывают эксперименты (рис. 4.4 в), с увеличением твердости уровень *Rz* снижается. Однако при увеличении твердости сверх определенного предела (300 *HB* или 32 $HRC_Э$) ее влияние на *Rz* несущественно. При повышении твердости снижается зависимость *Rz* от скорости резания.

Витебский государственный технологический университет

При затуплении инструмента на его режущих лезвиях образуются неровности, которые переносятся на поверхность резания и обработанную поверхность. Кроме того, скругление режущей кромки, обязательно сопровождающее процесс изнашивания, и увеличение площадки трения на задней грани режущего клина приводят к существенному увеличению пластических деформаций в подповерхностном слое, что также повышает высоту неровностей.

При обработке инструментом, у которого предусмотрено дополнительное режущее лезвие *Л* (рис. 4.3 в) длиной $l > s$, параллельное направлению подачи *S* (образующей обработанной поверхности), высота *H* неровностей, возникающих по геометрическим причинам, должна быть равна нулю. Неровности на обработанной поверхности в данном случае возникают вследствие пластического деформирования, трения по задней грани, изменения контура дополнительной режущей кромки из-за ее износа. Экспериментальные исследования показали, что при достаточно высокой твердости заготовки (твердость больше 32 $HRC_Э$) коэффициент перекрытия $K_{ПЕР} = l/s$ в пределах 2...6 существенно уменьшает высотные параметры шероховатости.

Вибрации (вынужденные и автоколебания), сопровождающие процесс резания, обычно увеличивают шероховатость. Например, при увеличении амплитуды осевых (параллельных подаче) колебаний от нуля до 0,2 мм значение параметра *Rz* шероховатости при точении увеличивается от 5 до 38 мкм.

При шлифовании в режиме полного самозатачивания параметр *Ra* шероховатости увеличивается пропорционально увеличению номера зернистости абразивного материала шлифовального круга. Чем меньше зерна, тем меньше их разновысотность и расстояние между ними вдоль образующей рабочей поверхности круга. Процесс изнашивания круга после некоторого этапа приработки ведет к увеличению параметра *Ra*. Главной причиной этого является неравномерность износа. На рабочей поверхности шлифовального круга образуются волны. Амплитуда волнистости может достигать 15...25 мкм. Эти волны вызывают высокочастотные радиальные колебания, резко увеличивающие уровень *Ra*. Характер и темп изменения *Ra* зависят от метода правки и свойств правящего инструмента.

Окончательно уровень *Ra* формируется обычно в конце цикла шлифования на этапе выхаживания. Однако если время выхаживания превышает некоторый оптимальный уровень $\tau_{опт}$, то дальнейшее выхаживание не дает эффекта. Наоборот, при очень малых значениях силы P_y процесс шлифования часто становится неустойчивым, возникают автоколебания, ведущие к увеличению значения параметра *Ra* (рис. 4.5 а). Вообще, при шлифовании вибрации являются одной из основных причин образования шероховатости (и волнистости). Характер влияния вибраций, вызванных дисбалансом шлифовального круга, при различ-

Витебский государственный технологический университет

ных уровнях жесткости j_1 и j_2 технологической системы и постоянном времени выхаживания показан на рисунке 4.5 б.

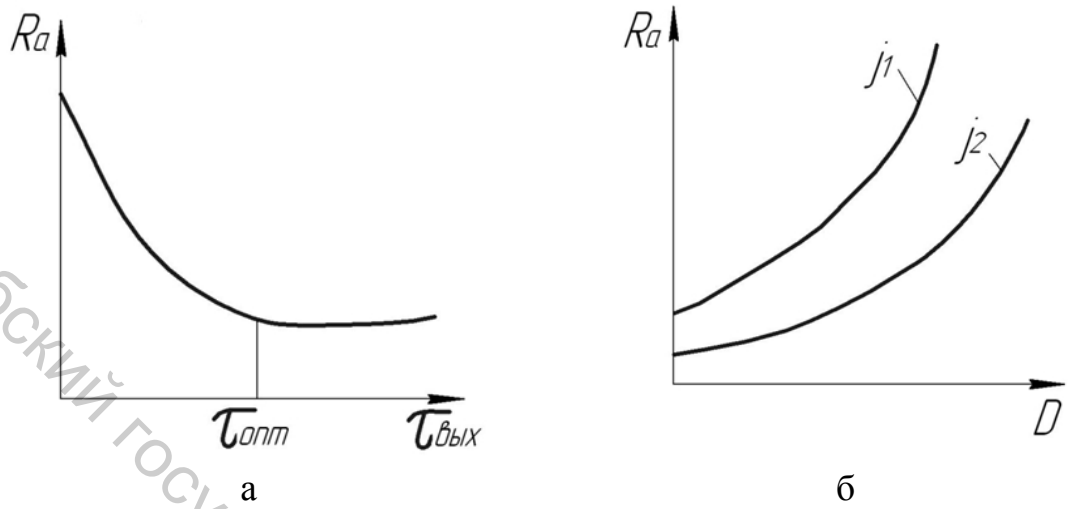


Рисунок 4.5 – Влияние на параметр Ra (j_1<j_2):
а – времени выхаживания $\tau_{вых}$, б – дисбаланса шлифовального круга

На высотные параметры шероховатости, образующейся при обработке способами ППД, оказывают существенное влияние давление в зоне контакта инструмента и заготовки, продольная подача, форма и размеры деформирующего элемента, исходная шероховатость обрабатываемой поверхности и физико-механические свойства материала обрабатываемой заготовки. Остальные параметры обработки на уровень параметра шероховатости влияют незначительно.

С увеличением нормальной силы *P* при обкатывании и раскатывании параметр *Ra* уменьшается, но до определенного предела – при оптимальной силе $P_{ОПТ}$ (рис. 4.6 а). При увеличении твердости и снижении пластичности материала заготовки значения $P_{опт}$ возрастают. Следует, однако, заметить, что, хотя сила *P* является основным параметром, исходя из которого разрабатываются практические рекомендации по режимам обкатывания, в сущности эффективность процесса зависит от среднего давления *p* на поверхности контакта, которое может быть различным при одной и той же силе *P* (рис. 4.6 б). Оптимальное давление $p_{ОПТ}$ несколько возрастает при увеличении твердости материала заготовки. Но если при обкатывании стали 20 оптимальное давление (1,70 кПа) достигается при *P =650 Н*, то при обкатывании стали *У8* оптимальное давление, равное 2 кПа, достигается при *P = 1350 Н*. При обкатывании закаленных сталей, имеющих твердость 58...62 $HRC_Э$, $p_{ОПТ}$ = *2,6...2,8 кПа*. Давление *p* зависит не только от силы *P*, но и от радиусов кривизны инструмента и заготовки в месте контакта.

Зависимость параметра *Ra* от числа $N_{прох}$ проходов с заданным значением *P* показана на рисунке 4.7 а. Увеличение числа проходов

Витебский государственный технологический университет

сверх оптимального приводит к шелушению поверхности и увеличению шероховатости. Резкое ухудшение поверхности происходит при испытаниях после 25 проходов: появляются многочисленные микротрещины, чешуйки, начинается процесс разрушения (шелушения) подповерхностного слоя.

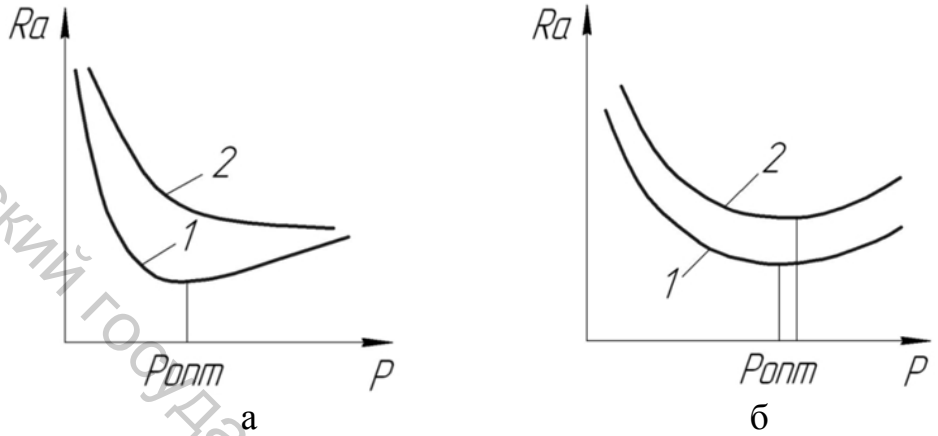


Рисунок 4.6 – Влияние на параметр *Ra* при обработке ППД материалов разной твердости:
а – нормальной силы P, б – давления *p* в зоне контакта;
1 – для HB_1; 2 – для HB_2 (HB_1<HB_2)

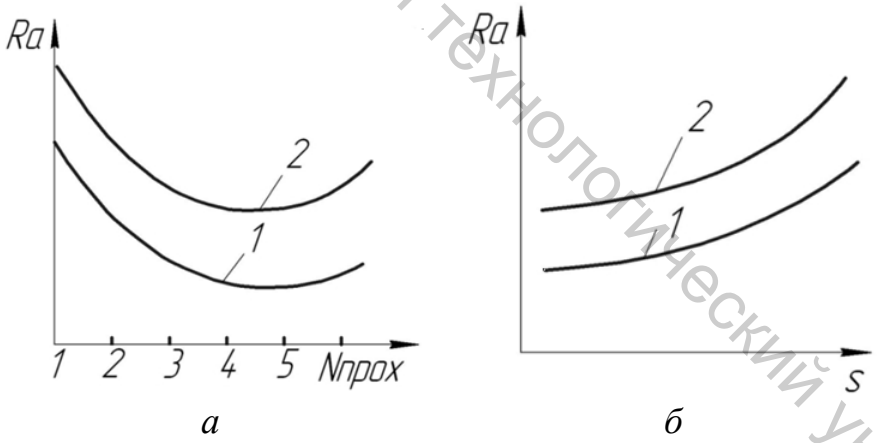


Рисунок 4.7 – Влияние на параметр *Ra* при обработке ППД материалов разной твердости:
а – числа проходов *Nпрох*, б – продольной подачи; S 1 – для HB_1;
2 – для HB_2 (HB_1<HB_2)

Изменение подачи *s* и радиуса *r* деформирующего элемента существенно влияет на параметр *Ra* (рис. 4.7 б). Высота микронеровностей прямо пропорциональна подаче во второй степени и обратно пропорциональна радиусу деформирующего элемента (шара). Но в результате наблюдений установлено, что при накатывании существует «граничная» подача, превышение которой существенно влияет на *Rz*. Эта подача за-

Витебский государственный технологический университет

висит от твердости заготовки. Так, например, при обкатывании высокопрочных сталей шарами диаметром 5...10 мм уменьшение подачи от 0,12 мм/об практически не влияет на *Ra*, а увеличение подачи сверх этого значения приводит к резкому увеличению *Ra*. При обработке заготовок из отожженных сталей 20 и 15 это граничное значение подачи равно 0,2 мм.

Влияние исходной шероховатости на шероховатость, полученную после обработки способами ППД, показано на рисунке 4.8 а. Однако оно начинается только с определенного значения исходного параметра *Ra*, которое зависит от твердости и пластичности материала заготовки. Например, при обкатывании незакаленных сталей с давлениями, близкими к оптимальным, исходные неровности до *Ra* = 3...4 мкм практически не влияют на значение *Ra* (0,15...0,2 мкм) после обработки. При давлении ниже оптимального вследствие неполной деформации исходных неровностей их влияние проявляется более резко. То же самое происходит при обкатывании более твердых (улучшенных или закаленных) сталей. В этом случае *Ra* исходной поверхности начинает влиять при меньших, чем было указано, значениях (рис. 4.8 а, кривая HB_2).

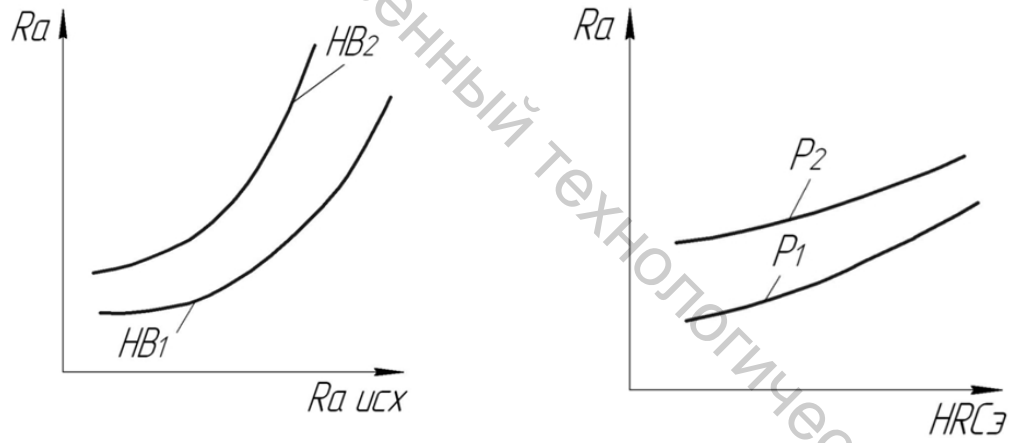


Рисунок 4.8 – Влияние на *Ra* при обработке материалов способами ППД: ($HB_1<HB_2$,, $p_1<p_2$): а – параметра шероховатости $Ra_{исх}$ исходной поверхности, б – твердости материала заготовки

Как видно из рисунков 4.6...4.8, твердость материала заготовки существенно влияет на параметр *Ra*. Чем выше твердость, тем хуже обрабатываются способами ППД заготовки, т.е. с увеличением твердости заготовки параметр *Ra* при прочих равных условиях тоже увеличивается, так как с увеличением твердости понижается пластичность и исходные неровности деформируются менее полно. А по мере увеличения исходных неровностей их деформирование все более затрудняется.

Характер зависимости параметра *Ra* от условий обработки одинаков и для обкатывания (раскатывания), и для выглаживания. Но алмаз-

Витебский государственный технологический университет

ное выглаживание обеспечивает получение более ровной и менее шероховатой поверхности (с меньшим значением *Ra*), чем обкатывание, особенно это проявляется при обработке закаленных сталей.

Результаты обработки способами ППД зависят также от направления пластического деформирования по отношению к направлению предшествующей обработки. Наименьшая шероховатость и более однородная поверхность без местных повреждений образуются при противоположных направлениях рабочих движений на смежных операциях. Так, например, при совпадении направления вращения расточной борштанги с направлением вращения выглаживающего инструмента во время обработки отверстия в чугунной заготовке были получены значения параметра *Ra* от 0,18 до 0,5 мкм. А при выглаживании в тех же условиях, но с изменением направления вращения инструмента, значения параметра *Ra* снизились до 0,1...0,28 мкм. Те же результаты были получены при раскатывании отверстия после его растачивания. Это можно объяснить снижением сопротивления пластическому деформированию после предварительного пластического деформирования противоположного знака.

4.3 Влияние способов и условий обработки на состояние подповерхностного слоя материала

Состояние подповерхностного слоя обычно характеризуется двумя сравнительно легко определяемыми показателями: степенью упрочнения *N* и глубиной (толщиной) упрочненного слоя $h_{СЛ}$. Степень упрочнения определяется выражением

$$N = 100(H_{\text{уп}} - H_{\text{исх}}) / H_{\text{исх}} \ (\%),$$

где $H_{уп}$ – микротвердость обработанного (упрочненного) материала; $H_{исх}$ – микротвердость исходного материала заготовки [2–5, 97–101].

Эксперименты показали, что с увеличением расстояния *h* от поверхности микротвердость монотонно уменьшается от $H_{уп}$ до $H_{исх}$ в соответствии с моделью

$$H = H_{\text{исх}} + (H_{\text{уп}} - H_{\text{исх}}) \exp(-kx) ,$$

где *k* – параметр, характеризующий темп снижения микротвердости в упрочненном слое.

Витебский государственный технологический университет

Влияние скорости резания на степень и глубину упрочнения не является монотонным. Оказалось, что существует оптимальная скорость резания, при которой эти показатели будут минимальными. Увеличение подачи не меняет характера влияния скорости резания на степень и глубину упрочнения, а только уменьшает значение оптимальной скорости резания.

При уменьшении переднего угла от +15° до -15° глубина упрочнения увеличивается почти в 3 раза, а степень упрочнения – на 13 %. Увеличение радиуса скругления режущего лезвия повышает степень и глубину упрочнения при всех подачах, особенно если он больше, чем толщина среза. Существенно влияет на упрочнение увеличение износа инструмента по задней поверхности. Наибольшее влияние на упрочнение оказывает фаска износа на задней грани при скоростях резания, больших или меньших оптимальной. Например, при увеличении фаски износа от 0 до 0,4 мм и оптимальной скорости резания глубина упрочнения увеличивается на 20 мкм, а степень упрочнения – на 4 %. А при обработке со скоростями, меньшими или большими оптимальной, глубина упрочнения возрастает на 55...70 мкм, а степень упрочнения – на 8...10 %.

Стали и сплавы, обладая различными прочностными и пластическими свойствами, по-разному упрочняются при обработке резанием. Увеличение относительного удлинения при разрыве (показатель пластичности) существенно увеличивает степень и глубину упрочнения. При многофазной структуре большее упрочнение получают те структурные составляющие, которые более склонны к деформированию и упрочнению.

Марка инструментального материала в широком диапазоне скоростей резания значительно влияет на коэффициент трения на задней поверхности инструмента, а следовательно, на степень и глубину упрочнения. Инструментальный материал, обеспечивающий меньшее значение коэффициента трения, формирует подповерхностный слой детали с меньшими степенью и глубиной упрочнения. Например, поверхность, обработанная резцом из сплава Т14К8, имеет меньшие глубину и степень упрочнения по сравнению с поверхностью, обработанной резцом из сплава ВК8. Это связано с тем, что с увеличением содержания карбидов вольфрама повышается склонность к адгезионному взаимодействию материалов инструмента и заготовки, увеличивается коэффициент трения на задней поверхности.

Формирование подповерхностного слоя у закаленных и незакаленных сталей (чугунов) при шлифовании происходит по-разному. Кратковременные тепловые импульсы при шлифовании незакаленных сталей не могут привести к структурным изменениям в подповерхностном слое, так как не успевают произойти необходимые для этого диффузионные процессы. Процесс стружкообразования при шлифовании

Витебский государственный технологический университет

сопровождается значительными пластическими деформациями в подповерхностном слое, что способствует упрочнению. Однако высокие температуры в зоне резания вызывают разупрочнение материала, и его наклеп при этом снижается.

Особенностью формирования подповерхностного слоя при шлифовании закаленной стали является то, что ее структура может изменяться под действием даже кратковременных тепловых импульсов, так как при этом в основном происходят бездиффузионные процессы (переход $\alpha \rightarrow \gamma$) , а распад твердых растворов требует значительно меньших тепловых затрат, чем их образование. При низкой производительности процесса и нормальной (30 м/с) или пониженной скорости шлифования подповерхностный слой упрочняется (наклёпывается) так же, как у незакаленных сталей. При повышении производительности и недостаточном охлаждении происходит отпуск мартенсита (прижог отпуска) и микротвердость материала становится ниже исходной. При дальнейшем повышении производительности и обильном охлаждении наблюдается вторичная закалка (прижог закалки). Быстрое охлаждение поверхности, выходящей из зоны шлифования, формирует аустенитно-мартенситную структуру. Слой вторичной закалки при этом имеет высокую микротвердость (выше микротвердости мартенсита), хотя и может содержать до 60...70 % аустенита. Это обусловлено мелкодисперсной структурой аустенита и его упрочнением. Обычно под вторично закаленным слоем находится слой с пониженной микротвердостью. При значительной производительности и недостаточном охлаждении может наблюдаться отпуск вторично закаленного слоя.

При выхаживании производительность процесса шлифования непрерывно уменьшается, что приводит к некоторому увеличению степени упрочнения. Оптимальное время выхаживания для получения поверхности с достаточно малой шероховатостью и достаточным упрочнением материала при врезном шлифовании составляет 8... 12 с.

Обработка способами ППД вызывает в подповерхностном слое значительно большее упрочнение, чем обработка резанием (кривая 1 на рисунке 4.9 а). Глубина упрочненного слоя также значительно больше. С увеличением силы *P*, с которой рабочее тело (шар, ролик, алмазный наконечник) прижимается к обрабатываемой поверхности, возрастает как степень, так и глубина (толщина слоя) упрочнения (рис. 4.9 а). Однако такая связь имеет место только до определенного предела. В каждом конкретном случае существует предельное значение силы *P*, превышение которого приводит не к повышению, а к понижению микротвердости обработанного материала (рис. 4.9 б). При алмазном выглаживании максимальное повышение твердости выше и достигается при значительно меньших значениях нормальной силы, чем при обкатывании шарами. На рисунке 4.9 б алмазному выглаживанию соответствует

Витебский государственный технологический университет

кривая *1*, а обкатыванию шаром – *2*. Радиус сферы деформирующего инструмента в обоих случаях был один и тот же.

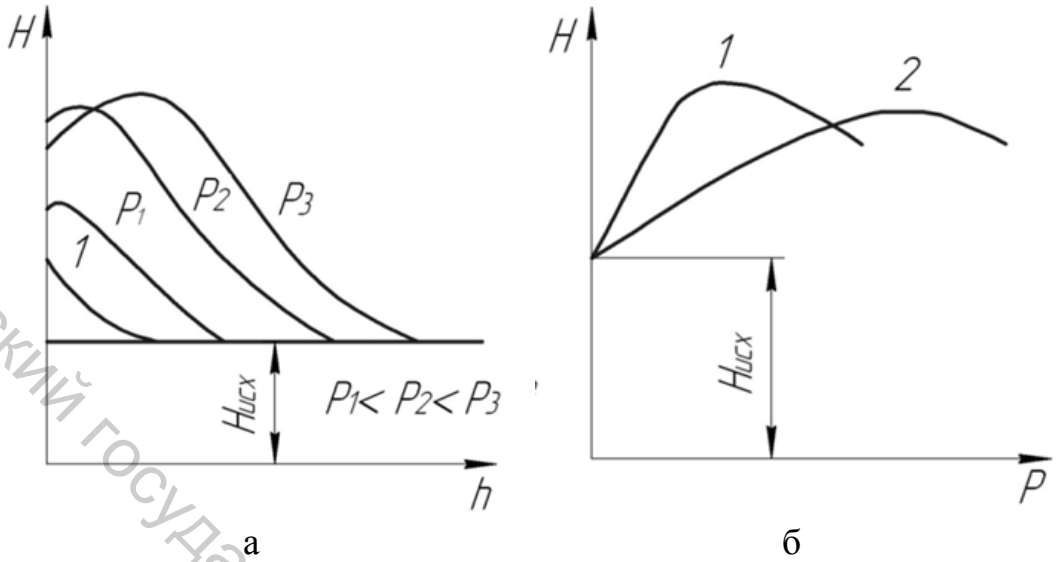


Рисунок 4.9 – Зависимость степени и глубины (толщины слоя) упрочнения от условий обработки способами ППД

С увеличением диаметра рабочего элемента выглаживающего (накатывающего) инструмента снижается максимально достижимая степень упрочнения и существенно повышается необходимое для ее достижения значение нормальной силы. Это предельное значение нормальной силы зависит от механических свойств обрабатываемого материала. У мягких и пластичных материалов и сплавов оно меньше, чем у более твердых и менее пластичных. Так, например, у армко-железа прирост твердости прекращается при значениях *P*, больших 0,5 кН, а у сталей 20, 45 и У8 – соответственно при значениях 1; 1,8 и 2 кН. Прирост твердости поверхности, обработанной способами ППД, существенно зависит от структуры материала заготовки. Минимальный прирост твердости наблюдается при обработке сорбита и троостита, а максимальный – ферритно-перлитной структуры.

Высокую склонность к упрочнению при выглаживании обнаруживают аустенитные стали, особенно при предварительном охлаждении заготовок до -70 °С. Это связано с тем, что при пластическом деформировании аустенитных сталей происходит не только упрочнение аустенита, но и аустенитно-мартенситное фазовое превращение. Деформация мартенситной структуры сопровождается интенсивным дисперсионным твердением и превращением остаточного аустенита в мартенсит.

Изменение подачи и скорости в пределах, рекомендуемых для обкатывания и алмазного выглаживания, практически не влияет на глубину и степень упрочнения. Увеличение числа проходов при обкатывании или выглаживании с оптимальным значением нормальной силы практи-

Витебский государственный технологический университет

чески не увеличивает твердость обработанного материала. Но если давление ниже оптимального, то повторные проходы (до определенного числа) повышают твердость. При этом допустимое, с точки зрения упрочнения, число проходов тем больше, чем меньше оптимальное значение силы *P*. А если рабочее значение нормальной силы больше оптимального, то дополнительные проходы ведут к уменьшению твердости обработанной поверхности.

Витебский государственный технологический университет

4.4 Управление качеством поверхности при шлифовании

Экспериментальные исследования показали, что глубина структурно измененного слоя (прижогов) при шлифовании закаленной стали при прочих равных условиях приблизительно линейно зависит от объемной производительности процесса шлифования (или от параметров, функционально связанных с ней). Один из примеров такой зависимости при круглом врезном шлифовании образцов из стали ШХ15 кругом 24А40СМ2К5 со скоростью шлифования $\upsilon_к$ = 35 м/с и скоростью вращения заготовки $\upsilon_з$ = 135 м/мин показан на рисунке 4.10. Круг считается «острым» непосредственно после его правки. Объемная производительность *Q* связана со скоростью υ_r уменьшения радиуса заготовки известным выражением

$$Q = \pi D_з B v_r,$$

где $D_з$, *B* – соответственно диаметр и ширина заготовки.

Анализ графиков на рисунке 4.10 позволяет сделать следующие выводы: 1) в каждом конкретном случае существует критическая производительность $Q_{крит}$, при которой не образуется прижогов; 2) по мере изнашивания и затупления шлифовального круга значения $Q_{крит}$ уменьшаются, а глубина (толщина) дефектного слоя (прижогов) увеличивается; 3) зависимость между глубиной прижогов *X* и параметрами производительности съема припуска можно отразить следующей моделью:

$$X = K_Д (Q - Q_{крит}) \quad \text{при } Q > Q_{крит};$$

$$X = O \text{ при } \quad Q \le Q_{крит}$$

или

$$X = \pi D_з B K_Д (v_r - v_{г\,крит}),$$

где $K_Д$ – коэффициент дефекта.

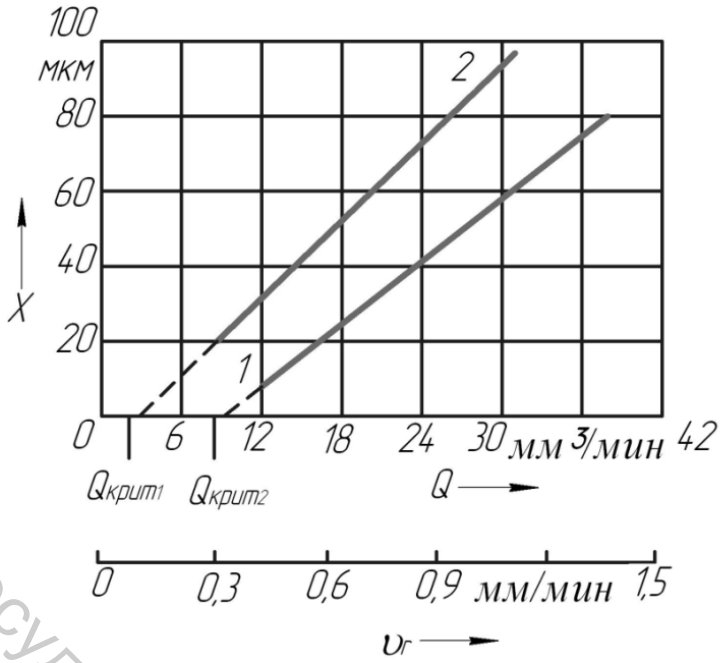


Рисунок 4.10 – Зависимость глубины (толщины) дефектного слоя (прижогов) от интенсивности удаления материала заготовки при шлифовании «острым» (1) и «затупленным» (2) кругами

Чтобы в подповерхностном слое шлифованной детали не было структурных изменений, необходимо либо шлифовать с интенсивностью съема припуска ниже критической (но в этом случае сильно снижается производительность), либо так изменять параметры режима шлифования, чтобы в любой момент времени глубина X прижога была меньше припуска $П$, который еще остался, т.е. $X \leq П$. Если подставить это неравенство в модель (4.19), получим

$$Q \geq Q_{\text{крит}} + П / \text{К}_{\text{Д}} .$$

Данное выражение можно назвать тепловым ограничением производительности процесса шлифования.

При управлении процессом шлифования необходимо, кроме теплового, учитывать и силовое ограничение производительности. На начальных этапах рабочего цикла съема припуска силовое ограничение определяется допустимой (с точки зрения получаемой на этом этапе погрешности формы или относительного расположения) упругой деформацией технологической системы (следовательно, значением радиальной силы P_y). В некоторых случаях силовое ограничение выбирается из условия сохранения режима работы круга (например, частичного самозатачивания). На последнем этапе рабочего цикла силовое ограничение может быть получено из условия обеспечения требуемого значения параметра шероховатости. Схема ограничений производительности при

Витебский государственный технологический университет

шлифовании показана на рисунке 4.11, где $П_0$ – исходный припуск, $П_1$ и $П_2$ – значения припуска, при которых пересекаются линии теплового и силовых ограничений. В общем случае эти линии в пределах $П_0$ могут и не пересекаться. Тогда производительность ограничивается только тепловыми процессами в зоне шлифования.

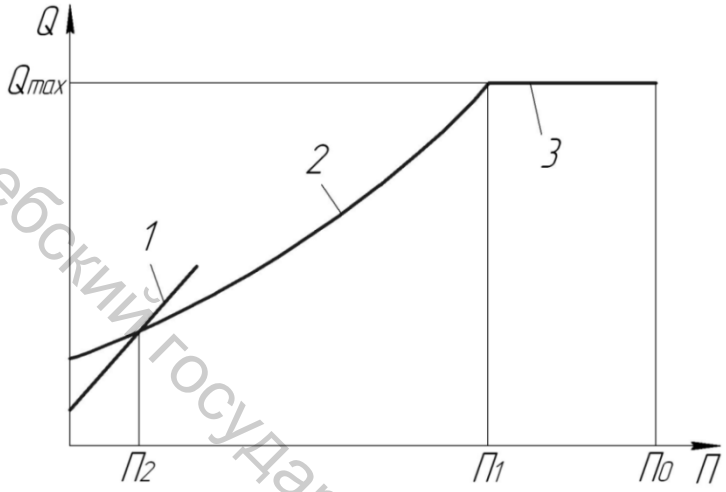


Рисунок 4.11 – Схема ограничений производительности при шлифовании: 1, 3 – силового; 2 – теплового

Часть времени шлифования, непосредственно связанную со съемом припуска, будем называть *рабочим циклом* шлифования. Он может быть разбит на ряд последовательных этапов, каждый из которых выполняет определенную функцию (предварительное шлифование, чистовое, выхаживание). *Алгоритмом управления съемом припуска* будем называть программу изменения скорости одного или нескольких рабочих движений за время рабочего цикла в соответствии с функцией выполняемого этапа. Целью управления съемом припуска является минимизация затрат времени и (или) денег на его реализацию при обязательном обеспечении требований к качеству шлифованной поверхности и подповерхностного слоя. Программа изменения скорости рабочих движений может быть задана как функция той части припуска, которую осталось снять, или как функция времени. При определении параметров любого алгоритма съема припуска необходимо обязательно учитывать ограничения производительности.

Наиболее часто на практике применяется ступенчатый алгоритм управления съемом припуска по каналу (СтАЛП), который состоит из ряда подач, последовательно уменьшающихся от начала рабочего цикла к его концу. Согласование параметров рабочего цикла с тепловыми ограничениями для СтАЛП является сложной задачей, так как сводится к решению системы трансцендентных уравнений, и может быть выполнено только с помощью ЭВМ.

Наиболее эффективным является *граничный алгоритм управления съемом припуска по каналу радиальной подачи* (ГрАЛП), в котором подача изменяется так, чтобы скорость v_r уменьшения радиуса заготовки (или глубина шлифования) в любой момент шлифования соответствовала требованиям силового и теплового ограничений. Использование ГрАЛП снижает время съема припуска на 10...80 % по сравнению со

Витебский государственный технологический университет

СтАЛП, который согласован с ограничениями производительности. Причем чем выше жесткость технологической системы и коэффициент режущей способности $K_{реж}$, тем эффективнее ГрАЛП по сравнению со СтАЛП.

Для реализации ГрАЛП используется система автоматического управления на базе микроЭВМ. Схема такой системы приведена на рисунке 4.12. В процессе круглого шлифования заготовки 1 кругом 2 с помощью прибора активного контроля ДП (датчика припуска) непрерывно фиксируется изменение диаметра заготовки. Одновременно измеряется упругая деформация у одного из элементов технологической системы. Эта деформация пропорциональна радиальной силе шлифования P_y. Задающее устройство (*ЗУ*) формирует сигналы (уставки), пропорциональные заданным значениям параметров k, Q_{max}, $Q_{крит}$, $K_Д$, где k – коэффициент пропорциональности между фактической производительностью и упругой деформацией; $Q_{\max}$ – максимальная, согласно силовому ограничению, производительность. Все эти сигналы, а также сигналы от *ДП* и *Ду* поступают в счетно-логическое устройство (*СЛУ*), которое формирует сигнал, пропорциональный требуемой ограничениями подаче, и передает его в исполнительное устройство (*ИСУ*) для обработки.

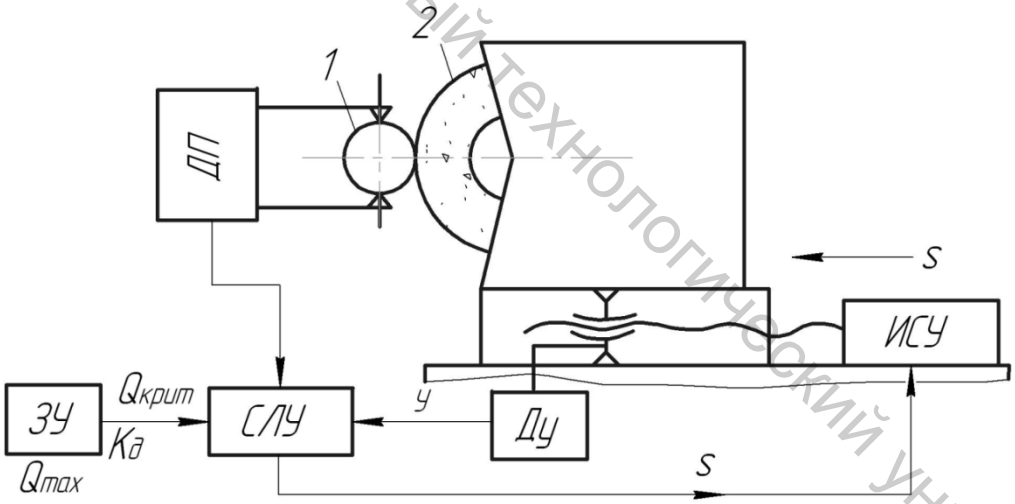
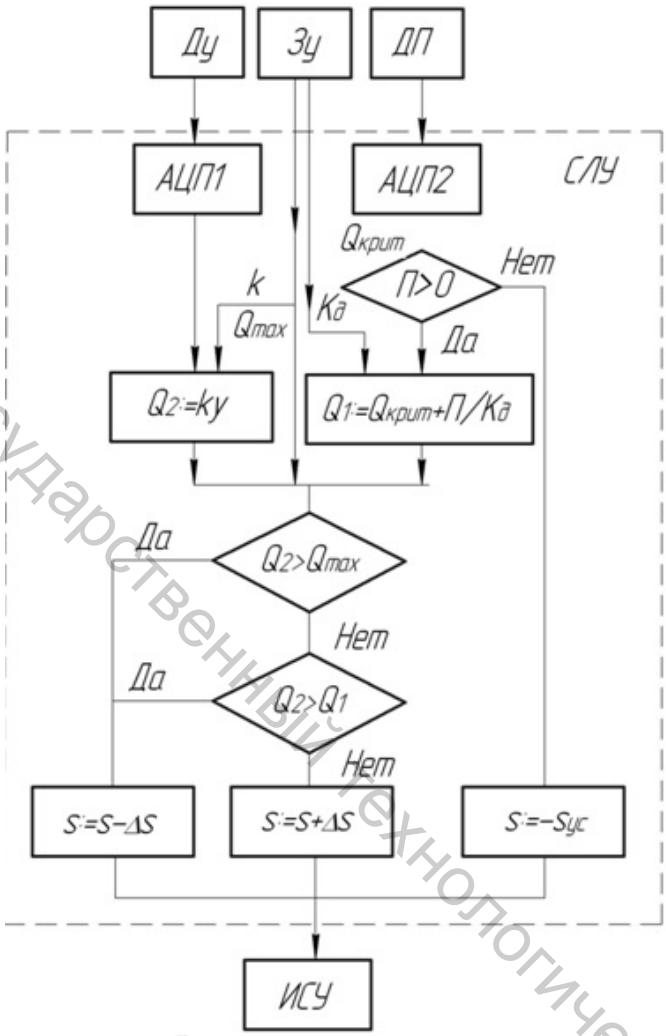


Рисунок 4.12 – Система автоматического управления циклом съема припуска при круглом врезном шлифовании

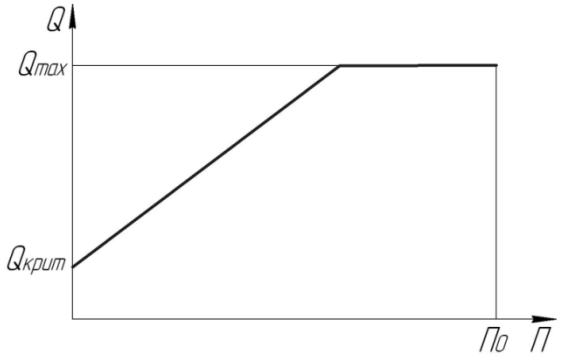
Схема алгоритма работы *СЛУ* показана на рисунке 4.13 а. На рисунке 4.13 б дана упрощенная схема ограничений производительности шлифования. Пока не снят весь припуск ($П > 0$), сигналы от *Ду* и *ДП* через аналогово-цифровые преобразователи *АЦП1* и *АЦП2* передаются с определенной частотой в вычислительное устройство, которое вычисляет значения фактической (Q_2) и допустимой тепловым ограничением

Витебский государственный технологический университет

(Q_1) производительности, сравнивает их между собой и с Q_{max}, и, в зависимости от результатов, изменяет на дискрету Δs текущее значение подачи. Когда припуск $П$ становится равным нулю, включается ускоренный отвод бабки шлифовального круга (подача $s_{ус}$).



а



б

Рисунок 4.13 – Круглое врезное шлифование при круглом врезном шлифовании:
а – алгоритм работы СЛУ системы автоматического управления циклом съема припуска, б – ограничения

Витебский государственный технологический университет

Чтобы повысить эффективность систем управления съемом припуска, необходимо создать условия шлифования, существенно повышающие параметры ограничений производительности. Главным является снижение температуры в зоне шлифования. Обычное охлаждение поливом почти не уменьшает максимальную температуру в зоне шлифования (рис. 4.14). Оно уменьшает теплосодержание шлифуемой заготовки в целом за счет быстрого охлаждения за пределами зоны шлифования. Такая низкая эффективность охлаждения поливом объясняется влиянием воздушных потоков, которые образуются быстро вращающимся пористым шлифовальным кругом. Эти потоки создают вблизи зоны шлифования область повышенного давления, и падающая струя СОЖ практически не проникает в зону резания. Чем больше скорость вращения круга $\upsilon_к$, тем меньше СОЖ попадает в зону шлифования. При скоростном шлифовании, когда $\upsilon_к \geq 50...70$ м/с, процесс резания протекает практически всухую.

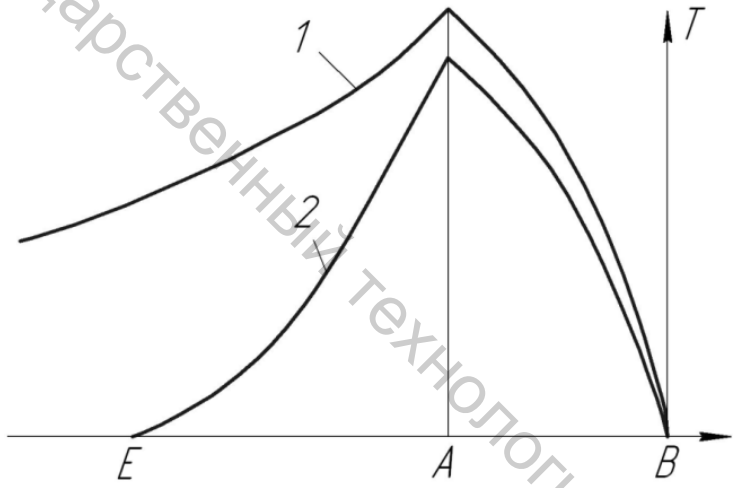


Рисунок 4.14 – Изменение температуры Т в зоне шлифования (А-В) и на шлифованной поверхности (А-Е) при шлифовании без охлаждения (кривая 1) и с охлаждением (кривая 2)

На рисунке 4.15 показан способ подачи СОЖ, обеспечивающий ее проникновение в зону контакта круга *4* со шлифуемой заготовкой *3*. Часть СОЖ подается через сопло *2* как обычно, свободно падающей струей, а часть – в промежуток между кожухом *1* и рабочей поверхностью круга. Здесь СОЖ, разгоняясь за счет трения о круг, попадает в клиновую часть (*E*) устройства, где вследствие перехода кинетической энергии струи в потенциальную резко повышается давление, за счет которого СОЖ «задавливается» в подповерхностные слои круга. Из этих слоев СОЖ под действием центробежных сил попадает в зону шлифования, как это указано стрелками. Испытания показали, что данный способ подачи СОЖ по сравнению с обычным обеспечивает почти дву-

Витебский государственный технологический университет

кратное снижение объемного износа круга и более чем двадцатикратное повышение съема металла за период стойкости круга. При этом прижогов не наблюдается.

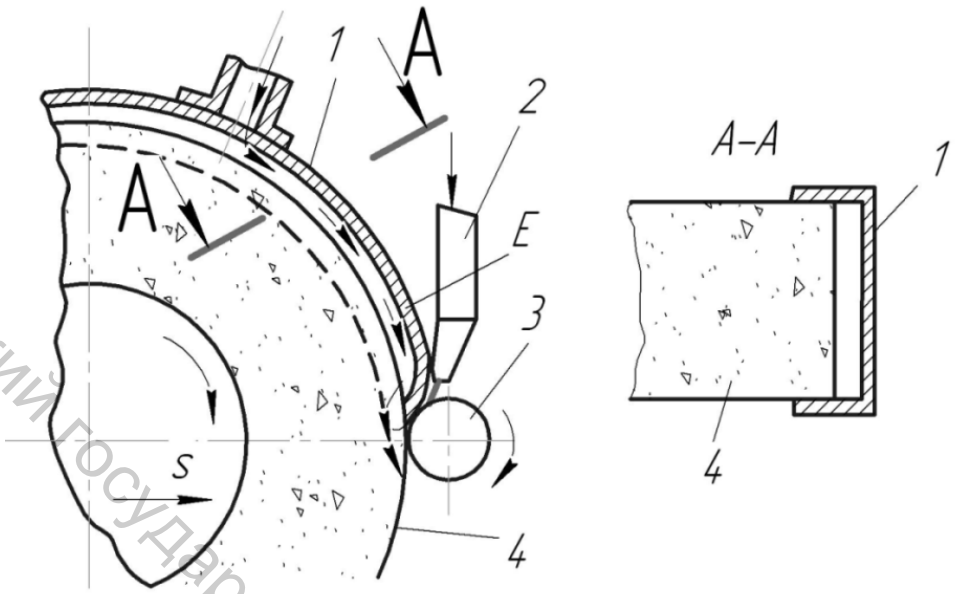
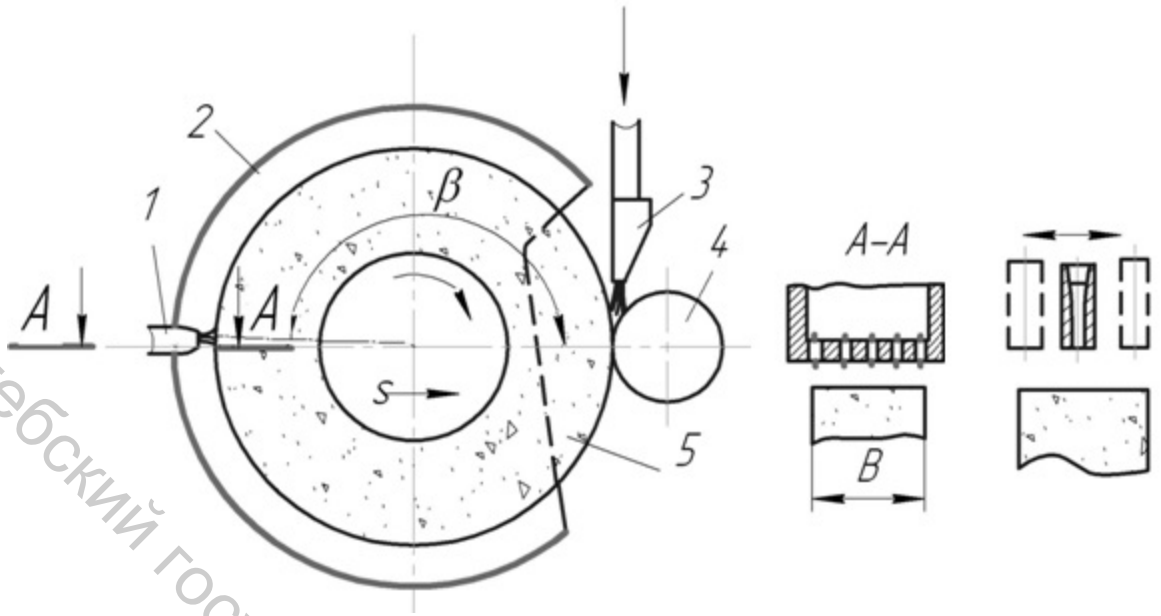


Рисунок 4.15 – Схема комбинированной подачи СОЖ при круглом шлифовании

Достаточно эффективным оказался способ подачи СОЖ, показанный на рисунке 4.16 а. В данном случае подача СОЖ свободно падающей струей из сопла 3 сочетается с вынесенной за пределы зоны шлифования (сдвиг фазы на угол β) гидроочисткой круга высоконапорной струей СОЖ из размещенного в кожухе *2* сопла *1*, которое может быть неподвижным многоканальным (рис. 4.16 б) или подвижным одноканальным (рис. 4.16 в). Расход СОЖ через неподвижное многоканальное сопло увеличивается пропорционально ширине круга, что требует соответствующего повышения мощности насосной станции. Поэтому использовать такое сопло при шлифовании широкими кругами затруднительно, а иногда и невозможно. В этих случаях целесообразно применять подвижное сопло, либо движущееся возвратно-поступательно, либо качающееся, либо вращающееся. Испытания подачи СОЖ со струйно-напорной очисткой показали, что при этом: в 1,15...2,47 раза увеличивается коэффициент режущей способности шлифовального круга ($K_{реж}$); наибольший эффект увеличения $K_{реж}$ имеет место при шлифовании сталей и сплавов, склонных к адгезии с материалом абразивных зерен (эффект засаливания); наибольший эффект увеличения $K_{реж}$ имеет место при чистовом шлифовании и при использовании в качестве СОЖ смеси сульфофрезола (90 %) и дизельного топлива; существенно увеличивается период стойкости круга; повышается точность формы шлифованной поверхности в продольном и поперечном сечениях.

Витебский государственный технологический университет



а б в

Рисунок 4.16 – Схема подачи СОЖ со струйно-напорной очисткой круга:
1, 3 – сопла; 2 – кожух; 4 – заготовка; 5 – шлифовальный круг

Существенное снижение теплонапряженности процесса может быть достигнуто, если шлифование осуществлять кругом с прерывистой рабочей поверхностью (рис. 4.17). Для этого на рабочей поверхности круга предварительно формируют тем или иным способом канавки, направленные параллельно оси круга или под углом β (для уменьшения уровня вибраций). Если дно спиральной канавки расположено не на цилиндре, а на конусе, то круг, работая как диагональный вентилятор, будет под давлением прогонять СОЖ, подаваемую путем свободного полива к его торцу, в зону шлифования. Прокачка СОЖ через прорези круга обусловлена в данном случае действием кориолисовых сил инерции. Характер изменения температуры в зоне сплошного и прерывистого шлифования иллюстрируется графиками, приведенными на рисунке 4.18. Эксперименты показали, что максимальная температура $T_{прер}$ при шлифовании прерывистым кругом в два и более раз ниже, чем температура $T_{спл}$ при шлифовании сплошным кругом. Оптимальная длина выступов (l_1 на рисунке 4.17), при которой достигается максимальное снижение температуры, как показали эксперименты, составляет 10...40 мм. При этом длину впадины l_2 из соображений сохранения достаточно высокой износостойкости круга следует выбирать согласно равенству $l_2 = (0,3...0,5)l_1$.

Витебский государственный технологический университет

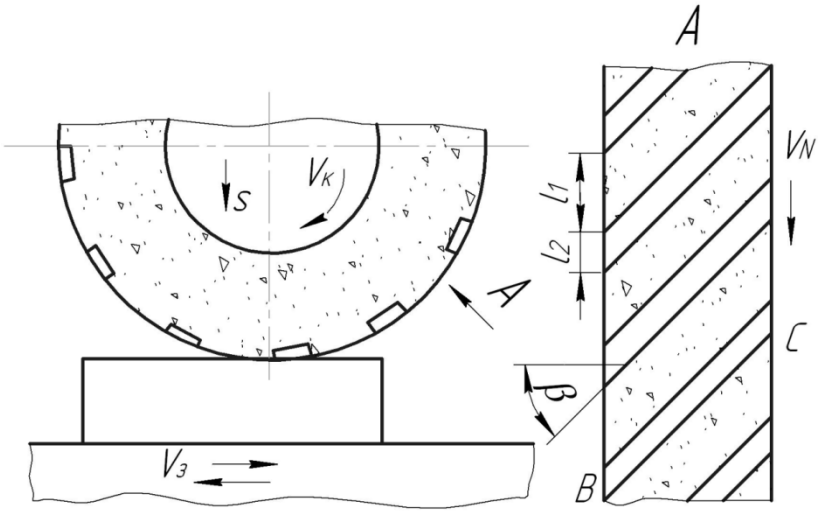


Рисунок 4.17 – Схема плоского шлифования кругом с прерывистой рабочей поверхностью

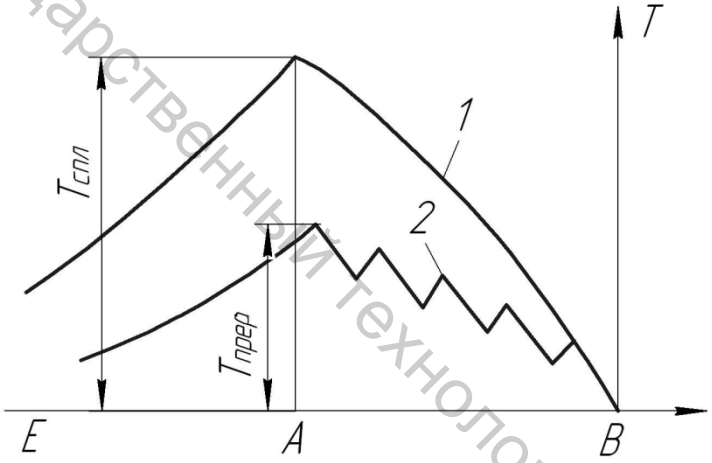


Рисунок 4.18 – Изменение температуры в зоне шлифования:
1 – при обработке сплошным кругом, 2 – прерывистым

С увеличением скорости υ_3 перемещения заготовки длина выступа l_1 должна уменьшаться. Так, согласно расчетам, при изменении скорости заготовки от 10 до 15 м/мин длину выступа следует уменьшить с 34 до 23 мм. При этом уровень уменьшения температуры $T_{прер}$ сохранится.

Круги с прерывистой рабочей поверхностью сохраняют длительное время хорошую режущую способность. Так, в интервале 30-минутного шлифования заготовок из стали 12Х12Н4А сплошным кругом коэффициент режущей способности уменьшился более чем в 2 раза, а при шлифовании прерывистым кругом его значение практически не изменилось. А сразу после правки круга значения $K_{реж}$ для прерывистого круга были на 20...30 % больше, чем для сплошного.

Прерывистые круги, пазы которых заполнены твердой смазкой, а также круга, имеющие на рабочей поверхности периодически чередую-

Витебский государственный технологический университет

щиеся участки с различной твердостью, называют *композиционными*. Испытание опытной партии кругов с графитовыми вставками показало, что максимальная температура в зоне шлифования уменьшилась на 30...40 %. А при испытании кругов, имеющих по четыре режущих сектора твердостью СМ2 и ВМ2, установлено, что такая конструкция круга снижает максимальную температуру в зоне шлифования на 15...20 % по сравнению со сплошным кругом твердостью СМ2.

Витебский государственный технологический университет

4.5 Влияние вибраций на процесс и результаты обработки

4.5.1 Источники вибраций при лезвийной обработке резанием и шлифовании

Вибрации, возникающие во время обработки (т.е. между инструментом и заготовкой), а также во время холостых перемещений и позиционирования, в зависимости от вызывающих эти вибрации причин можно разбить на два класса. К первому относят *вынужденные колебания*, которые вызываются и поддерживаются энергетическим источником периодического характера. Таким источником может быть процесс резания, например при фрезеровании и протягивании, когда периодически изменяется суммарное сечение среза (а значит, и сила резания), или при точении с переменной глубиной резания, когда ось вращения и ось симметрии заготовки не совпадают. К первому классу относятся также вибрации, вызванные дисбалансом быстровращающихся элементов рассматриваемой технологической системы или передаваемые через опоры от другого технологического оборудования [2–5, 97–101].

Частота вынужденных колебаний равна частоте вынуждающей силы, а их амплитуда зависит от динамической жесткости технологической системы. Обычно технологическая система имеет не одну, а несколько частот собственных колебаний, поэтому частотная характеристика динамической жесткости имеет не один, а несколько минимумов.

Вибрации в технологической системе могут возникнуть и при отсутствии явной (внешней) вынуждающей периодической силы. Причем в отличие от свободных колебаний эти вибрации могут быть незатухающими и при наличии диссипативных (рассеивающих энергию, демпфирующих) сил. Такие вибрации называют *автоколебаниями* и относят ко второму классу. При автоколебаниях источник энергии, восполняющий ее потерю, связанную с работой диссипативных сил, по своей природе не является периодическим. Переменная сила, поддерживающая колебательное движение, создается самой замкнутой движущейся системой за счет ее внутренних связей и при прекращении процесса резания (или движения) исчезает.

Можно выделить следующие виды внутренних связей в технологической системе: координатные, скоростные и инерционные. *Координатная связь* проявляется в том, что связанное с какой-либо причиной перемещение в определенном направлении вызывает также перемещения вдоль других осей. *Скоростная связь* возникает в тех случаях, когда в системе действуют силы, являющиеся функциями скорости (силы резания и трения). Она проявляется, когда их изменение по одной координате вызывает изменение сил по другой. *Инерционная* (или *динамическая*) возникает в технологической системе при наличии в ней нескольких упруго связанных масс и в тех случаях, когда равнодействующая сил инерции не проходит через центр жесткости системы. В таких случаях одновременно с прямолинейным смещением происходит угловое, вызванное моментом сил инерции относительно центра масс.

Возбуждение автоколебаний или потеря устойчивости процесса обработки (а также холостых движений) обусловливается следующими причинами: нелинейной зависимостью силы резания (и трения) от скорости; запаздыванием силы по сравнению с перемещением; влиянием внутренних (координатных, скоростных и инерционных) связей; вторичным возбуждением от волнистости, образующейся на поверхности резания (заготовки) или рабочей поверхности шлифовального круга. В большинстве случаев наблюдается одновременное влияние нескольких из перечисленных причин, причем одна из них обычно доминирует, т.е. оказывает наибольшее влияние.

Частота автоколебаний (как и при свободных колебаниях) определяется частотой собственных колебаний системы. Для систем с несколькими степенями свободы возможны автоколебания на разных частотах: низкочастотные, соответствующие основной (минимальной) частоте собственных колебаний, и высокочастотные, когда устойчивость теряет элемент с высокой частотой собственных колебаний. Амплитуда автоколебаний зависит от многих факторов.

На рисунке 4.19 показана зависимость амплитуды A продольных автоколебаний стола с механическим (винтовым) приводом от скорости v его движения. Экспериментами установлено, что при потере устойчивости в данной системе, не подвергающейся действию сил резания, возникают автоколебания, складывающиеся из колебаний в направлении заданного движения и в направлении, перпендикулярном к плоскости скольжения. Соотношение амплитуд колебаний по этим направлениям составляет примерно 400:1. Установлено, что при некоторой скорости, зависящей от других параметров системы, начинается уменьшение амплитуды автоколебаний и после минимума может при дальнейшем увеличении скорости стола появиться новый максимум амплитуды. Между этими максимумами может быть область скоростей с отсутствием автоколебаний, т.е. устойчивого движения. При скорости v, большей 8... 10 м/мин, движение стола становится устойчивым.

Витебский государственный технологический университет

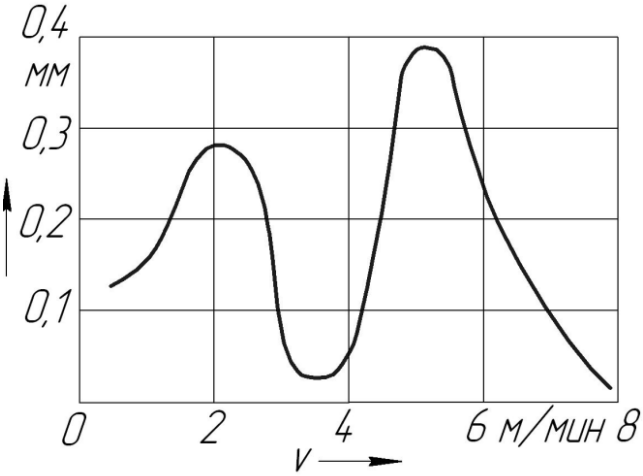


Рисунок 4.19 – Зависимость амплитуды продольных автоколебаний стола с механическим приводом от скорости его движения (без резания)

Эксперименты показали, что увеличение жесткости привода и вязкости смазочного материала уменьшает амплитуду автоколебаний. А разгрузка направляющих путем подачи смазочного материала под давлением (до 0,15 МПа) уменьшает области скоростей неустойчивого движения и амплитуду колебаний в этих областях. Замена механического привода стола гидравлическим устраняет вторую (по скорости движения) область существования автоколебаний, а первая область при этом сокращается до скоростей, меньших 0,2 м/мин. Максимальный уровень амплитуды автоколебаний стола с гидравлическим приводом оказался в 2 раза ниже, чем стола с механическим приводом.

Эксперименты показали, что при точении частота автоколебаний слабо зависит от показателей режима резания, а определяется главным образом основной частотой собственных колебаний технологической системы. Амплитуда автоколебаний при точении существенно зависит от условий обработки. Увеличение ширины среза (глубины резания) ведет к резкому увеличению амплитуды автоколебаний. Такое влияние ширины среза снижается при увеличении его толщины (подачи). При подачах, больших 0,6...0,8 мм/об, увеличение или уменьшение ширины среза практически не влияет на амплитуду автоколебаний.

Установлено, что существует скорость резания (35...50 м/мин), при которой амплитуда автоколебаний при точении достигает максимума. Ширина зоны скоростей, оказывающих существенное влияние на амплитуду автоколебаний, зависит от переднего угла резца и уменьшается с его увеличением. При этом уменьшается также максимальное значение амплитуды автоколебаний. Кроме того, установлено, что уменьшение главного угла в плане, увеличение радиуса скругления вершины резца и уменьшение жесткости технологической системы увеличивают амплитуду автоколебаний. Уменьшение заднего угла от 16°

Витебский государственный технологический университет

до 3° также не оказывает влияния на интенсивность автоколебаний. Однако при уменьшении заднего угла от 3° до 2° амплитуда автоколебаний увеличивается.

Эксперименты также показали, что, кроме рассмотренных выше относительно низкочастотных автоколебаний, при растачивании возникают высокочастотные, амплитуда которых зависит от глубины и скорости резания так же, как и амплитуда низкочастотных автоколебаний. Но характер влияния переднего и заднего углов расточного резца на амплитуду высокочастотных колебаний совсем не такой, как на интенсивность низкочастотных. В данном случае наблюдается оптимальное значение этих углов, при которых амплитуда автоколебаний либо равна нулю, либо минимальна при данной скорости резания. Если затупление резца обычно снижает амплитуду низкочастотных колебаний, то с увеличением износа резца по задней грани амплитуда высокочастотных автоколебаний увеличивается.

При круглом шлифовании с продольной подачей при увеличении скорости вращения заготовки амплитуда автоколебаний увеличивается тем в большей степени, чем меньше продольная подача и глубина шлифования. При круглом шлифовании, как показали эксперименты, частота автоколебаний зависит от их амплитуды. Так, при частоте собственных колебаний заготовки 352 Гц с увеличением амплитуды автоколебаний от 5 до 15 мкм их частота понижается с 600 до 400 Гц.

При врезном круглом шлифовании также было замечено увеличение амплитуды автоколебаний с 1 до 20 мкм, если скорость вращения заготовки увеличивается от 30 до 100 м/мин. Интенсивность автоколебаний возрастает при увеличении ширины шлифования и уменьшается при увеличении радиальной подачи.

При круглом шлифовании процесс высокочастотных автоколебаний обусловлен вторичным возбуждением, суть которого заключается в образовании волнистости на рабочей поверхности шлифовального круга благодаря его неравномерному радиальному износу. Скорость увеличения интенсивности автоколебаний в данном случае зависит от твердости круга (всегда существует оптимальная), от радиальной подачи и скорости шлифования. С увеличением радиальной подачи и уменьшением скорости шлифования растет средняя скорость радиального изнашивания, а значит, и скорость нарастания амплитуды высокочастотных автоколебаний.

Обычно в технологической системе наблюдаются оба класса источников вибраций. В зависимости от разности между частотой вынуждающей силы и частотами собственных колебаний могут существовать три вида колебательных движений. Если частота возмущающей силы близка к собственной частоте, то в системе устанавливается режим гармонической синхронизации. В этом случае частота колебаний системы равна частоте вынуждающей силы. При средней разности между ука-

Витебский государственный технологический университет

занными частотами в системе имеет место квазипериодическое движение – режим биений. В случае большой разности указанных частот в системе имеет место автоколебательное движение.

4.5.2 Борьба с вибрациями при обработке на станках

Вибрации обычно ограничивают возможность повышения производительности обработки, точности и качества обработанных поверхностей. Они создают дополнительные динамические нагрузки, часто снижающие стойкость инструмента и долговечность станка. Автоколебания в системе подачи станка обычно снижают точность позиционирования (выход суппорта или стола на заданный размер), что особенно нежелательно при обработке на станках с ЧПУ. Вибрации при обработке резанием увеличивают шероховатость обработанной поверхности и приводят к появлению волнистости [2–5, 97–101].

При обработке цилиндрической фрезой или шлифовальным кругом часто формы кривых профиля волнистой поверхности и траектории относительного перемещения инструмента и заготовки существенно различаются (рис. 4.20). Увеличение амплитуды 2А относительных колебаний инструмента и заготовки в таких случаях еще не означает увеличения высоты $H_{вол}$ волны на обработанной поверхности. Причиной этого явления считается процесс «самоперерезания» волн. Этот процесс начинается при тем большей амплитуде колебаний, чем меньше ее частота. При постоянной частоте колебаний «самоперерезание» волн наступает при тем меньшей скорости стола, чем меньше амплитуда относительных колебаний инструмента и заготовки.

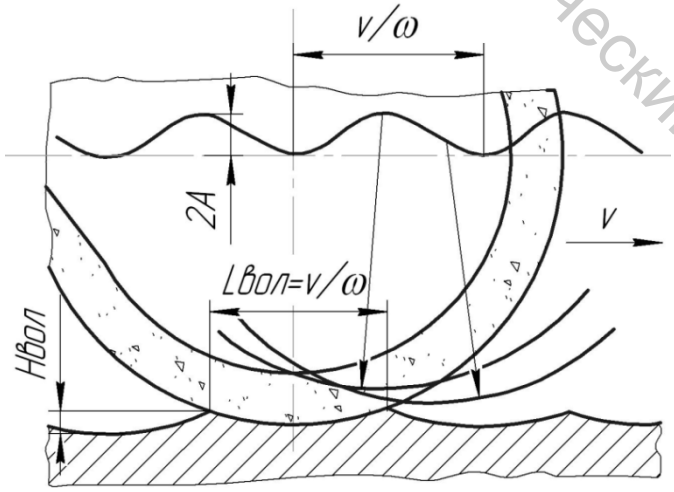


Рисунок 4.20 – Схема формирования волнистости при шлифовании: *Lвол* – длина волны; *v* – скорость относительного перемещения круга; ω – частота вынуждающей силы

Витебский государственный технологический университет

Для ослабления вынужденных колебаний станка, *передаваемых через фундамент от внешних источников*, станок необходимо удалить от них на достаточное расстояние и (или) установить на виброизолирующие устройства (резинометаллические опоры, виброизолирующие коврики и т.д.). Зависимость амплитуды колебаний фундамента $A_{фун}$ рассматриваемого станка от амплитуды колебаний $A_{ис}$ внешнего источника отражается следующей экспериментальной моделью:

$$A_{фун} = A_{ис}\ exp(-0,146L),$$

где L – расстояние от внешнего источника колебаний, м.

Наиболее существенной частью любого виброзащитного устройства является упругий элемент, обладающий достаточной податливостью и способный служить механическим фильтром низких частот. Широко распространены резинометаллические виброзащитные устройства (амортизаторы) различной конструкции, в которых резиновый упругий элемент привулканизирован к металлическим деталям крепления. Недостатком резиновых упругих элементов является их «старение» под действием температуры окружающей среды, влажности и кислорода воздуха. В настоящее время получили распространение демпфированные амортизаторы, снабженные специальными устройствами для рассеяния энергии колебаний – демпферами (воздушными, гидравлическими или сухого трения).

Для снижения вибраций, *вызванных работой собственных механизмов и приводов станка*, необходима тщательная балансировка быстровращающихся валов, шпинделей и двигателей. Хорошие результаты дает установка двигателей на виброизолирующие резиновые прокладки (амплитуда вибраций от таких двигателей уменьшается в 2...3 раза). Особенно важной является балансировка шлифовальных кругов, так как они в состоянии поставки имеют существенный дисбаланс, фаза и значение которого изменяются в процессе эксплуатации. Поэтому на прецизионных шлифовальных станках балансировка шлифовальных кругов производится не только после сборки с фланцами перед установкой на станок, но и периодически в процессе эксплуатации. Для такой балансировки разработано множество балансирующих устройств.

Одним из методов борьбы с автоколебаниями является *выбор таких условий работы* станка, при которых процесс позиционирования его узлов и процесс резания устойчивы. На рисунке 4.21 показана зависимость области устойчивости движения стола станка, не нагруженного силами резания, от скорости v движения, жесткости y привода и нагрузки на направляющие (массы стола). Из графиков на этом рисунке видно, что увеличение жесткости привода уменьшает область скоростей скольжения, где движение неустойчиво. Увеличение нагрузки на

Витебский государственный технологический университет

направляющие (увеличение массы стола) для устойчивого движения требует повышения жесткости привода.

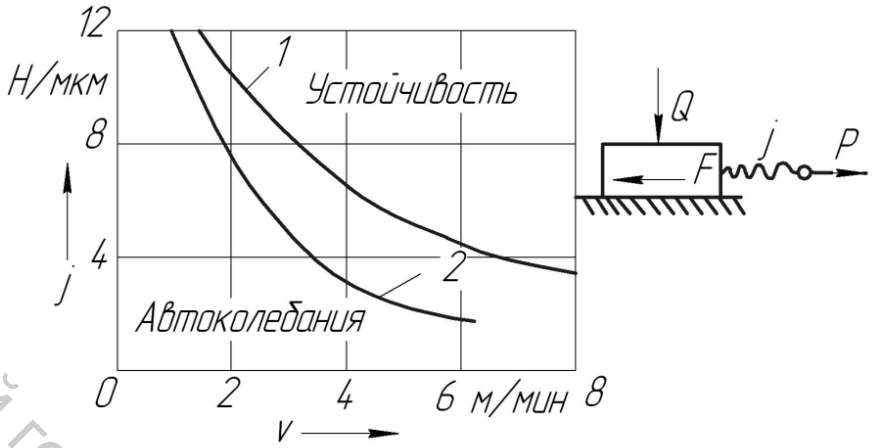


Рисунок 4.21 – Область устойчивости движения стола в параметрах скорости *v* жесткость *j* привода:
1 – масса стола 860 кг, 2 – масса 620 кг

Для повышения плавности перемещения элементов станков рекомендуется: исключать скорости скольжения и контактные давления, при которых возникает «схватывание»; уменьшать коэффициент трения за счет использования соответствующих материалов пары трения и смазывания; устранять непосредственный контакт трущихся поверхностей при движении и в относительном покое путем использования аэро- и гидравлических устройств в направляющих; повышать жесткость привода стола без уменьшения демпфирующей способности; совмещать векторы равнодействующих сил трения и упругих сил привода. Большая часть приведенных рекомендаций может быть использована при модернизации существующих или проектировании специальных станков, а также сложных приспособлений.

На рисунках 4.22...4.25 дано расположение областей устойчивости в зависимости от параметров и условий точения и фрезерования. Графики зависимости ширины *b* и толщины *c* среза на рисунке 4.22 а показывают, что при точении на токарном станке выйти из области автоколебаний можно либо за счет уменьшения ширины *b*, либо за счет увеличения толщины среза *c*. Увеличение частот ω_{01}, ω_{02}, ω_{03} собственных колебаний системы закрепления заготовки (за счет увеличения жесткости или уменьшения массы) расширяет область устойчивости процесса точения. Согласно графикам зависимости *b* от скорости *v* на рисунке 4.22 б, выход из зоны автоколебаний возможен как при увеличении, так и при уменьшении скорости резания, а также при уменьшении ширины среза. Увеличение частот собственных колебаний системы крепления

Витебский государственный технологический университет

заготовки и в данных экспериментах в основном расширяет зону устойчивого точения.

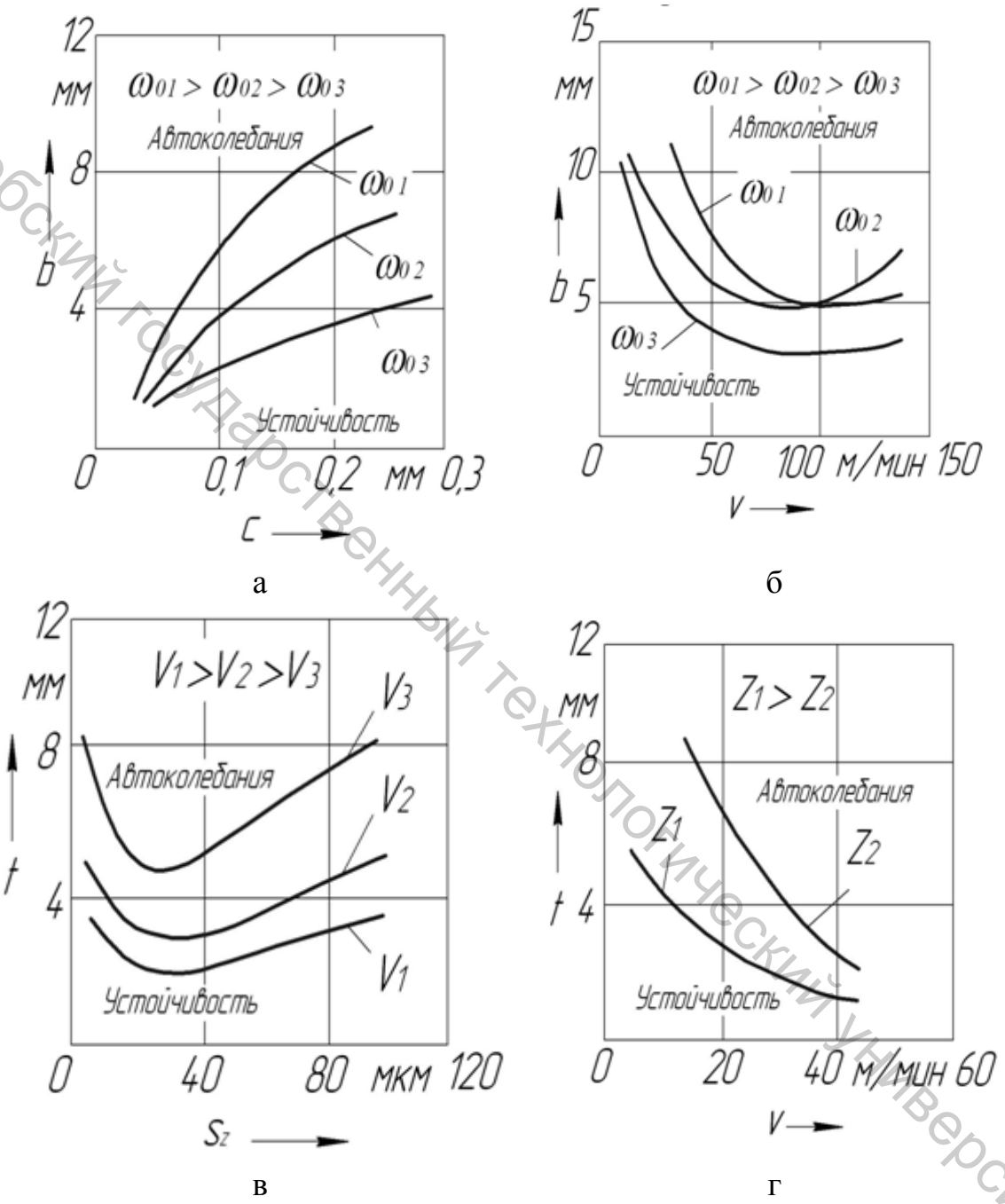


Рисунок 4.22 – Области устойчивости процесса резания при точении и фрезеровании

Витебский государственный технологический университет

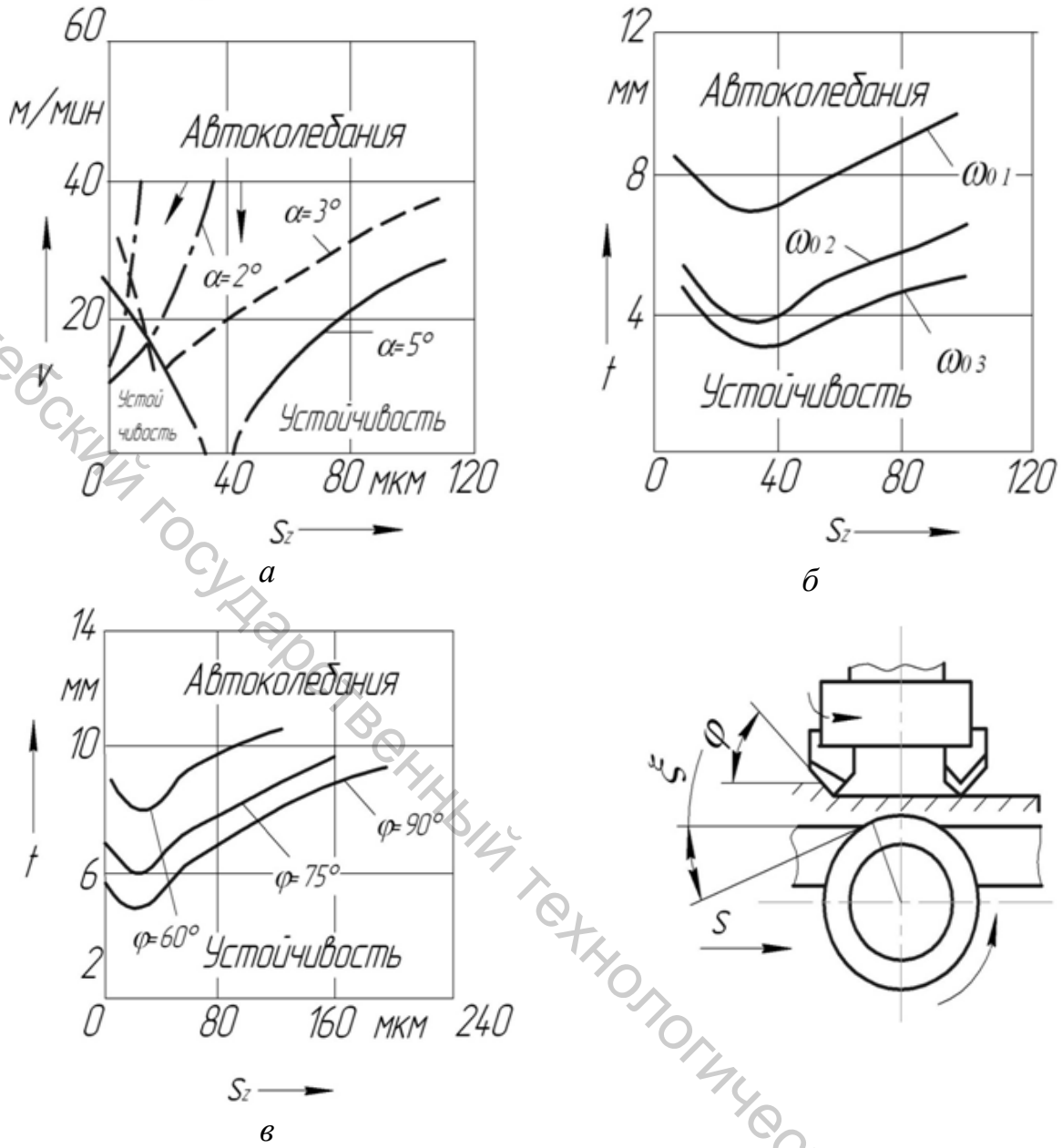


Рисунок 4.23 – Области устойчивости процесса резания при фрезеровании

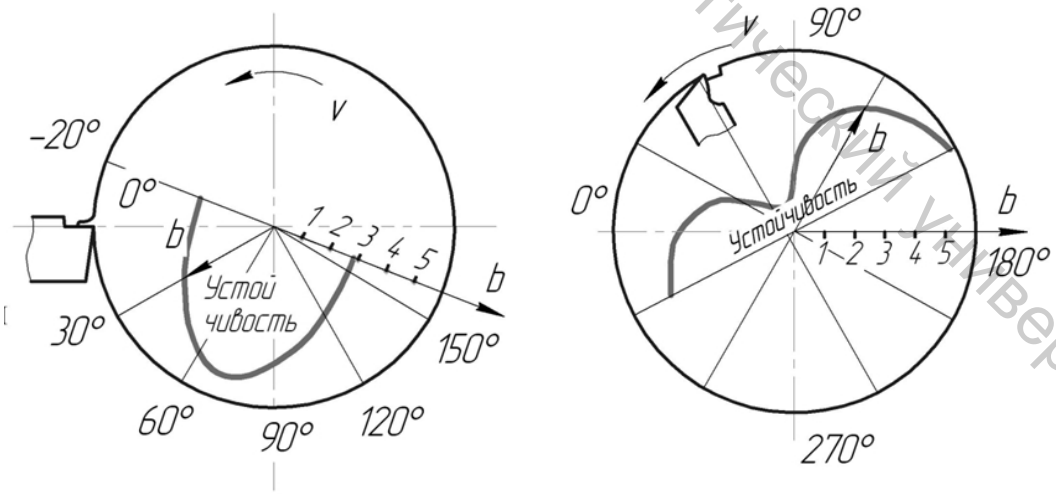
Графики зависимости глубины t резания от подачи s_z, приведенные на рисунке 4.22 в, показывают, что увеличение скорости резания v (с 14 до 35 м/мин) понижает границу устойчивости процесса фрезерования быстрорежущей торцовой фрезой. Выход из зоны автоколебаний возможен либо при увеличении, либо при уменьшении подачи на зуб S_z, а также при уменьшении глубины t фрезерования. Снижение границы устойчивости при повышении скорости v резания видно также на рисунке 4.22 г. Существенно понижаются границы устойчивого фрезерования при увеличении числа зубьев фрезы z (соответственно числа зубьев, одновременно находящихся в зоне резания). Уменьшение заднего

Витебский государственный технологический университет

угла α значительно сужает область автоколебаний при фрезеровании (рис. 4.23 а). А уменьшение частоты ω_0 собственных колебаний системы «шпиндель – фреза», которая изменялась путем крепления к фрезе дополнительного маховика, понижает границу устойчивого фрезерования (рис. 4.23 б). Аналогичное явление имеет место при уменьшении жесткости крепления фрезы к шпинделю.

Эксперименты показали, что устойчивость процесса резания зависит от ориентации силы резания относительно осей эллипса жесткости технологической системы. Ориентация силы резания изменялась за счет изменения угла в плане φ и угла входа ξ (рис. 4.23 в). Уменьшение угла φ повышает границу устойчивости. При опытах с углом в плане 45° и 30° автоколебания не возникали во всем диапазоне применявшихся значений глубины t фрезерования и подачи S_z . При фрезеровании с продольной подачей увеличение угла врезания увеличивает граничную глубину резания, а при фрезеровании с поперечной подачей – наоборот, уменьшает.

Опыты, проведенные на токарном станке со специальным резцедержателем, который позволял изменять угловое положение резца, показали, что предельная ширина среза точения существенно зависит от направления силы резания (рис. 4.24 а). Как можно видеть, автоколебания возникают при минимальной ширине b среза, когда резец находится в положении, обозначенном -20° и 160°, и при максимальной ширине среза, когда резец находится в положении, обозначенном 70°. Эти опыты показали, что нормальное положение резца почти совпадает с наименее благоприятной его ориентацией и что изменением ориентации можно было бы повысить предельную глубину резания t почти в 2 раза.

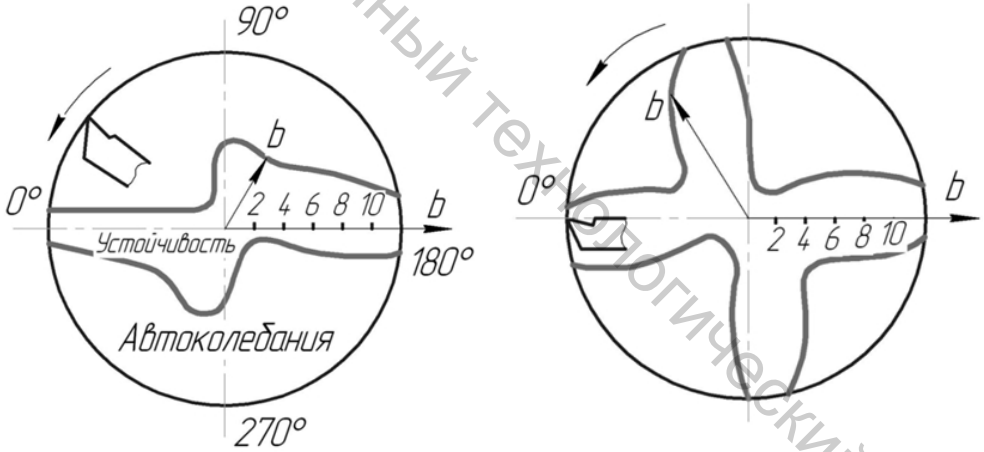


а б

Рисунок 4.24 – Зависимость устойчивости процесса резания на токарном станке от ориентации силы резания:
а – обтачивание, б – растачивание

Витебский государственный технологический университет

Зависимость устойчивости (максимальной ширины среза) от ориентации резца при растачивании отверстий на токарном станке показана на рисунке 4.24 б. Резец закреплялся в цилиндрической борштанге диаметром 55 мм и длиной 350 мм. Минимальная предельная ширина среза соответствует положению резца при смещении на угол 60° от горизонтального положения. При этом в вертикальном направлении жесткость системы минимальна, а в горизонтальном – максимальна. Значения граничной ширины *b* среза с наилучшей и наихудшей ориентацией находятся между собой в отношении 7:1. При увеличении диаметра борштанги до 80 мм положение и форма границ устойчивости существенно изменяются (рис. 4.25 а). На рисунке 4.25 б показаны результаты экспериментов, когда резец крепился в борштанге некруглого сечения. На ней вблизи места крепления были профрезерованы две лыски, так что ее жесткость зависела от направления прикладываемой силы. Резец все время сохранял горизонтальное, показанное на рисунке, положение. А борштанга занимала различные угловые положения, так что направление минимальной жесткости служит вектором, до которого отсчитывается угол поворота. Эксперименты показали, что можно подобрать четыре угловых положения борштанги, при которых предельная ширина *b* среза максимальна.



а б

Рисунок 4.25 – Зависимость устойчивости процесса растачивания от ориентации силы резания и оси эллипса жесткости оправки

Значительно повысить виброустойчивость процесса точения можно, *сместив точку приложения силы резания* относительно нейтральной оси изгиба державки (рис. 4.26 а) или изменив направление главных осей эллипса жесткости резца (рис. 4.26 б). Эта цель может быть также достигнута с помощью заточки виброгасящей фаски на главной режущей кромке (рис. 4.26 в). Угол фаски $\gamma_{фас}$ рекомендуется принимать в пределах -80°...-85°, а ширина фаски *f* равняется 0,1...0,3 мм при точении и 0,07...0,15 мм при растачивании. Вместо виброгасящей фаски

Витебский государственный технологический университет

можно выполнить скругление главной режущей кромки, которое, требует больших затрат времени.

Для *гашения колебаний при обработке на станках часто используют дополнительные устройства*, либо увеличивающие демпфирование, либо создающие силы, равные и противоположные по направлению возмущающей силе. Эти устройства называют обычно *виброгасителями*.

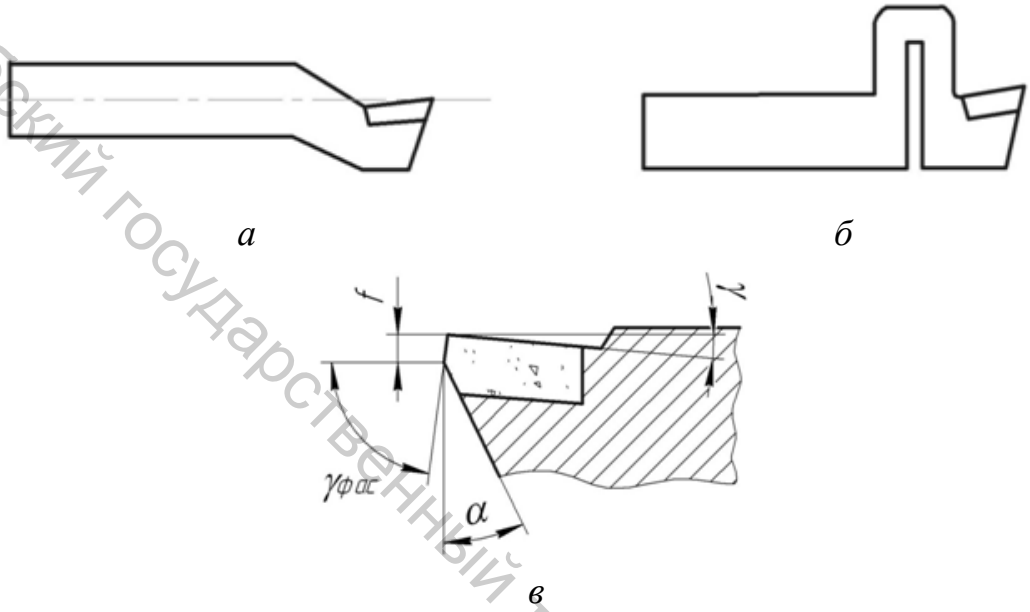


Рисунок 4.26 – Пример конструкций резцов и заточки, повышающих устойчивость резания

Динамический гаситель колебаний представляет собой массу, присоединенную к основной механической системе с помощью упругого элемента и элемента трения. Наиболее эффективно он гасит колебания в области резонанса. Уменьшив частоту собственных колебаний динамического виброгасителя, можно добиться некоторого снижения интенсивности вибраций в дорезонансной области (особенно в области очень низких частот). Если частота собственных колебаний динамического виброгасителя больше, чем частота собственных колебаний основной системы, то существенно уменьшается эффективность гашения вибраций в зоне резонанса, но зато появляется дополнительная область гашения вибраций в зарезонансной области.

Наиболее значительное влияние на эффективность гашения колебаний в области, близкой к резонансу, оказывает логарифмический декремент колебаний основной механической системы.

Схемы конструкций динамического виброгасителя для консольных борштанг, которые используются для растачивания на алмазно-

Витебский государственный технологический университет

расточных станках, показаны на рисунке 4.27. На конце борштанги *4* выполнена расточка, в которую помещают дополнительный груз *3* (цилиндр) с двумя резиновыми кольцами 2. Отверстие в борштанге закрывается крышкой *1*. Резиновые кольца осуществляют упруго-вязкую связь дополнительного груза и борштанги (рис. 4.27 а). Рекомендуется принимать массу груза *3* равной 0,125 приведенной массы борштанги, а его длина должна быть больше двух диаметров борштанги. Рекомендуемая ширина резиновых поясков 0,125...0,17 длины груза *3*.

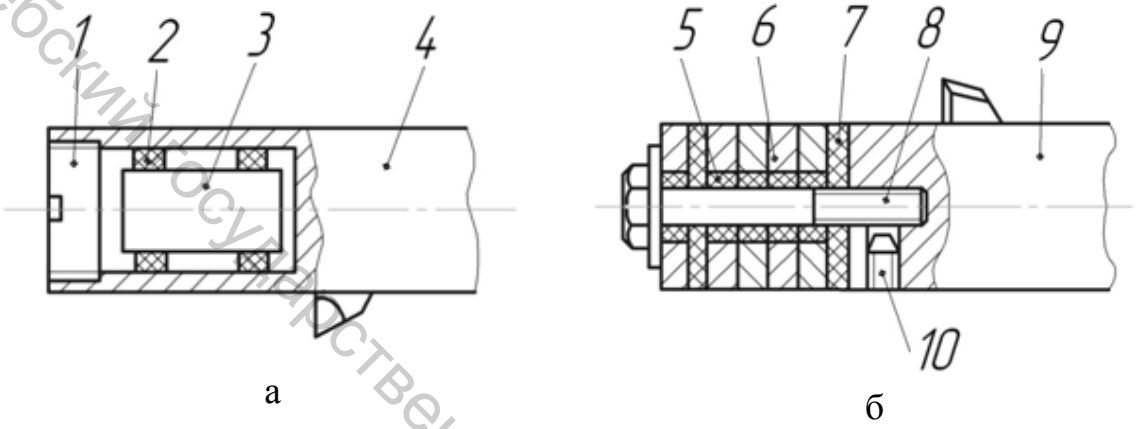


Рисунок 4.27 – Динамические гасители колебаний для расточных борштанг

На рисунке 4.27 б показана схема конструкции многомассового динамического виброгасителя. Набор грузов *6* прижимается к торцу борштанги *9* винтом *8* через резиновую прокладку *7*. В радиальном направлении грузы 6 центрируются резиновыми кольцами *5*. После регулировки силы сжатия грузов *6* винт *8* стопорится винтом *10*. Сила сжатия грузов зависит от диаметра борштанги и изменяется в пределах 10...40 Н. Эксперименты показали, что применение динамических виброгасителей при алмазном растачивании снижает волнистость (на 20...30 %) и шероховатость (в 2...3 раза).

Более простыми и надежными в работе являются ударные гасители колебаний (рис. 4.28). В них энергия колебаний рассеивается при ударе неабсолютно упругих тел. При гармонических колебаниях с амплитудой A и частотой ω рассеяние энергии будет максимальным, если в момент удара скорости груза и основной системы будут равны и противоположно направлены. Это условие может быть выполнено при определенном соотношении зазора δ и амплитуды колебаний A. Другими словами, время перемещения груза в пределах зазора от одной стенки до другой должно быть равно половине периода колебаний основной системы, откуда $2\delta=\pi A$.

Витебский государственный технологический университет

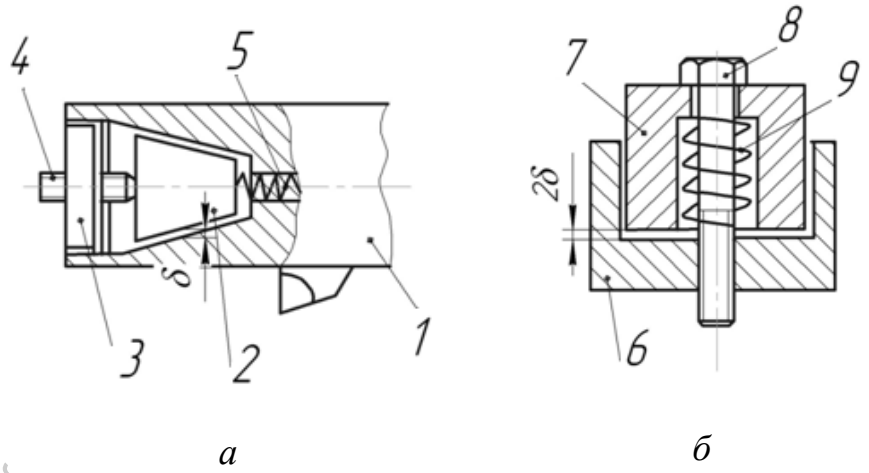


Рисунок 4.28 – Ударные гасители колебаний

В конструкциях, показанных на рисунке 4.28, предусмотрена возможность регулирования зазора *δ*. Ударный гаситель колебаний расточных борштанг *1* (рис. 4.28 а) представляет собой конический груз *2*, помещенный в коническую выточку в передней части борштанги, закрытую крышкой *3*. Для регулирования зазора груз *2* фиксируется в определенном осевом положении с помощью винта *4* и пружины *5*.

В конструкции виброгасителя, который можно прикреплять к резцу или хоботу фрезерного станка (рис. 4.28 б), зазор между грузом *7* и корпусом *6* регулируется винтом *8* и пружиной *9*. Чтобы обеспечить эффективное гашение вибраций, масса груза $m_{груз}$ должна равняться 0,33 приведенной массы основной системы. Указанная конструкция ударного гасителя колебаний может быть использована в устройствах контактного действия. Так, например, ударный виброгаситель *2* (рис. 4.29 а) можно встроить в рычаг *3* люнета так, что он будет соприкасаться с обрабатываемой заготовкой *1* через ролик под действием сил тяжести. Аналогично действует устройство, показанное на рисунке 4.29 б. В данном случае ударный гаситель *2* крепится к рычагу *3*, который может свободно поворачиваться вокруг оси *5*, присоединенной к резцедержателю *6*. Под действием сил тяжести рычаг через ролик *4* прижимается к обрабатываемой заготовке *1*. Ось этого ролика можно смещать вдоль рычага *3* так, чтобы линия, проходящая через эту ось и ось заготовки, была параллельна равнодействующей компонентов сил резания P_y и P_z. При этом эффективность виброгасителя максимальна.

Рассмотренные конструкции виброгасителей не позволяют автоматически управлять процессом гашения колебаний при изменении условий обработки с целью поддержания максимальной эффективности. Поэтому разработаны и разрабатываются электронные устройства, управляющие вибраторами, которые создают силу, равную по модулю и противоположную по фазе возмущающей силе.

Витебский государственный технологический университет

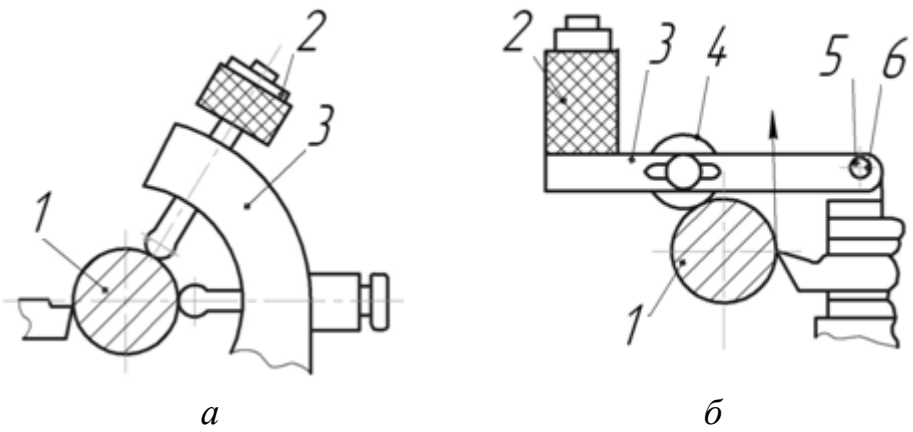


Рисунок 4.29 – Контактно-ударные виброгасители

Волнистость шлифованной поверхности может быть снижена, если созданы *условия для «самоперерезания» волн*. Для этого на этапе выхаживания рекомендуется снижать или повышать частоту вращения заготовки. Эксперименты показали, что таким способом можно снизить волнистость на 30...50 %. Если в процессе шлифования периодически изменять (в пределах 12...30 %) скорость вращения шлифовального круга, то, как показали эксперименты, можно в 2,5...2,8 раза уменьшать высоту волн на рабочей поверхности круга по сравнению с высотой волн при шлифовании с постоянной частотой вращения круга. На поверхности шлифованной детали высота волн уменьшается примерно в 10 раз, а параметр Ra – в 2,5...3 раза.

Для уменьшения эффекта вторичного возбуждения автоколебаний, кроме периодического изменения скорости резания, можно применять такие инструменты, как *фрезы, протяжки и развертки с неравномерным шагом*. Подбором неравномерности шага фрез можно влиять и на резонансные вынужденные колебания, возбуждаемые переменностью толщины срезаемой стружки. Для борьбы с этими колебаниями неравномерность шага устанавливается из условия

$$\frac{t_{\max} - t_{\min}}{t_{\text{ср}}} = \frac{nz}{60\omega},$$

где $t_{\max}$, $t_{\min}$, $t_{\text{ср}}$ – максимальный, минимальный и средний шаги фрезы; n – частота ее вращения; z – число ее зубьев; ω – частота колебаний, которые следует подавить.

Фрезы с различной неравномерностью шага работают эффективно каждая при своей скорости резания. Например, эксперименты показали,

Витебский государственный технологический университет

что фреза с перепадом соседних шагов, равным 1 мм, хорошо работает при скорости резания 56 м/мин, а при скорости резания 112 м/мин не дает никакого эффекта по сравнению с нормальным инструментом. Если фреза имеет перепад соседних шагов 1,5 мм, то она существенно снижает уровень вибраций при скорости 112 м/мин, а при скорости 56 м/мин не отличается от нормальной. Аналогичные явления наблюдаются при протягивании. Поэтому эффект от инструментов с переменным шагом зубьев нельзя считать достаточно универсальным, так как трудно подобрать неравномерность шага, одинаково приемлемую для относительно широкого диапазона режимов резания.

Витебский государственный технологический университет

4.5.3 Использование вибраций при обработке на станках

Низкочастотные и ультразвуковые механические колебания используются в комбинации с различными способами обработки для дробления стружки, повышения стойкости инструмента, уменьшения сил резания, повышения точности формы и качества обработанной поверхности, создания регулярного микрорельефа на обработанной поверхности. При этом используются три источника вибраций: специальное устройство; автоколебания технологической системы; специфическая форма рабочей части инструмента. Устройства для поддержания «технологических» колебаний (осцилляторы) можно разделить на ряд функциональных элементов: первичный двигатель, преобразователи энергии, генератор колебаний, серводвигатель, исполнительное звено и т.д. [2–5, 97–101].

В зависимости от вида и конструктивных особенностей функциональных элементов можно систематизировать осцилляторы по следующим признакам: вид энергии, используемой в генераторе колебаний и серводвигателе; наличие резонанса в колебаниях исполнительного звена; принцип работы генератора колебаний (кинематическое или силовое возбуждение колебаний). Направление колебаний может быть параллельно вектору скорости главного движения или подачи, т.е. лежать в плоскости, касательной к обработанной поверхности (характерно для низкочастотных колебаний), а также быть перпендикулярным к этой поверхности (характерно для ультразвуковых колебаний). Возможны и комбинации указанных направлений.

Устойчивое стружкодробление при точении с воздействием осевых (вдоль оси заготовки) колебаний имеет место, если амплитуда колебаний будет не меньше определенного значения, зависящего от условий обработки и материала заготовки (рисунок 4.30 и 4.31, где кривая *1* – для стали 45, а *2* – для стали 18ХГТ). С увеличением подачи *s* и глубины резания *t* требуемое минимальное значение амплитуды осевых ко-

лебаний резца (A_{min}) увеличивается. А при увеличении угла в плане φ оно уменьшается. Наибольшее влияние на требуемое значение A_{min} оказывают подача и вязкость материала заготовки.

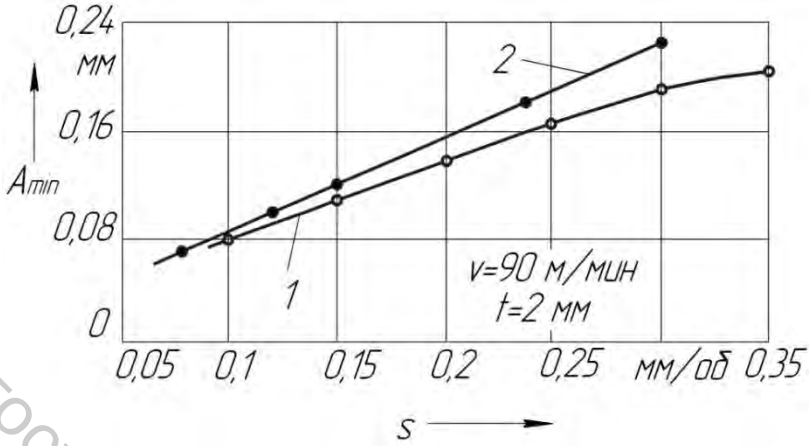
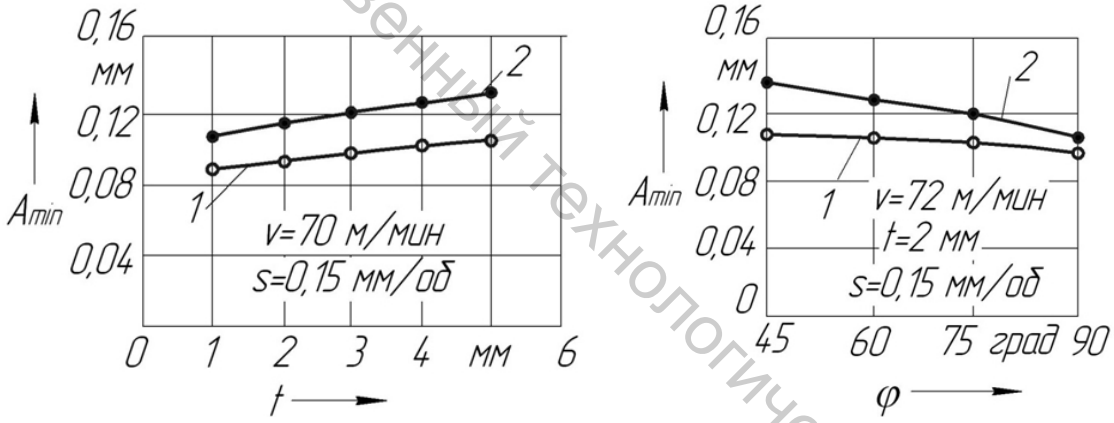


Рисунок 4.30 – Зависимость минимальной амплитуды колебаний, обеспечивающей стружкодробление, от подачи при точении



а б

Рисунок 4.31 – Зависимость минимальной амплитуды колебаний, обеспечивающей стружкодробление, от параметров режима точения и резца

Экспериментально установлено, что стружка при точении с воздействием осевых вибраций надежно дробится при всех частотах, отличающихся от частоты вращения заготовки n на 5...10 % и более. Рекомендуется при выборе частоты f колебаний выдерживать отношение f/n близким к одному из чисел следующего ряда: 1,5; 2,5; 3,5; 4,5;... так, чтобы длина элемента стружки (без учета усадки) была 60...100 мм. Выполнение данной рекомендации снижает шероховатость обработанной поверхности. В большинстве случаев надежное стружкодробление

Витебский государственный технологический университет

обеспечивается только при точении с воздействием вибраций в режиме прерывистого резания (релаксационные колебания).

Экспериментально доказано, что точение с наложением низкочастотных колебаний не только обеспечивает дробление стружки, но и на 40...50 % увеличивает стойкость резцов. Поскольку при этом увеличивается шероховатость обработанной поверхности, такой способ точения можно рекомендовать только для предварительной обработки. Кроме того, установлено, что в некоторых случаях осциллирующее точение значительно (в 2...3 раза) повышает параметр устойчивости технологической системы токарного станка (предельная ширина стружки *b*) к возникновению автоколебаний. При этом низкочастотные осевые колебания подачи создавались системой ЧПУ.

Применение кинематического дробления стружки при точении требует обычно серьезной модернизации станка. Этого недостатка лишен автоколебательный суппорт, схема которого показана на рисунке 4.32. Он состоит из державки *1* резца, которая может совершать качательное движение вокруг оси *5*. Жесткость этой системы определяется активной длиной L_a пластинчатой пружины *4*, которая регулируется подвижным упором *3* с помощью винта *2*. В случае необходимости к державке прикрепляется дополнительный груз (на схеме не показан). Данная конструкция позволяет регулировать амплитуду и частоту колебаний, вибрации прекращаются, когда износ резца по задней грани достигает 0,35...0,5 мм. Эксперименты показали, что в широком диапазоне скоростей резания (50...180 м/мин), подач (0,1...0,42 мм/об) и глубин резания (0,5...2,5 мм) энергии автоколебаний было вполне достаточно для дробления стружки.

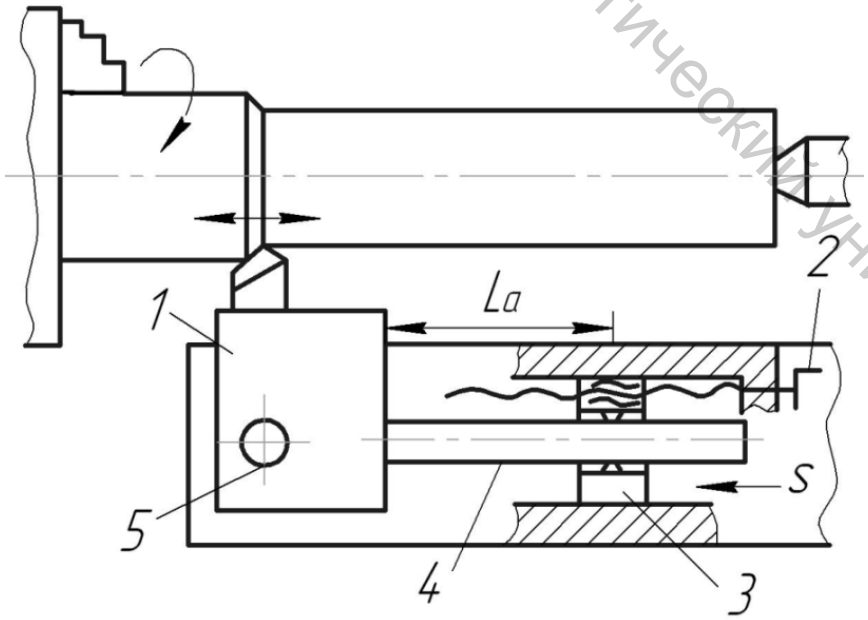


Рисунок 4.32 – Схема автоколебательного вибросуппорта

Витебский государственный технологический университет

Обрабатываемость при точении высоколегированных нержавеющих и жаропрочных сталей, а также титановых сплавов существенно повышается при использовании высокочастотных тангенциальных вибраций (параллельных скорости резания). Некоторые результаты испытания данного метода показаны на рисунке 4.33: графики *1* относятся к точению стали 12Х18Н10Т без вибраций, а *2* – к точению с вибрациями, амплитуда которых A = 0,2 мм, а частота f = 175 Гц. Графики показывают, что при скорости резания 40 м/мин стойкость T резцов при обычном точении выше, чем при точении с тангенциальными вибрациями. А при скорости 120 м/мин в зависимости от подачи S стойкость резца при точении с вибрациями повышается в 2...4 раза. Средняя скорость резания (80 м/мин) при точении является некоторой критической величиной, определяющей переход из области отрицательного влияния вибраций в область положительного влияния. Увеличение амплитуды вибраций снижает выигрыш в стойкости в 1,5...2 раза.

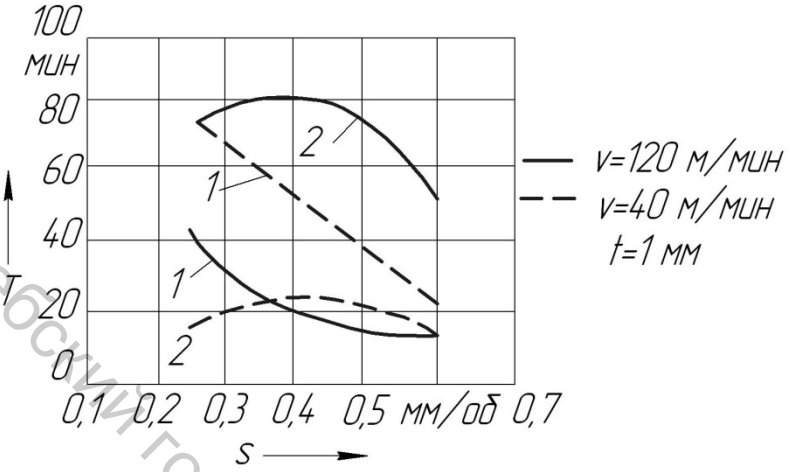
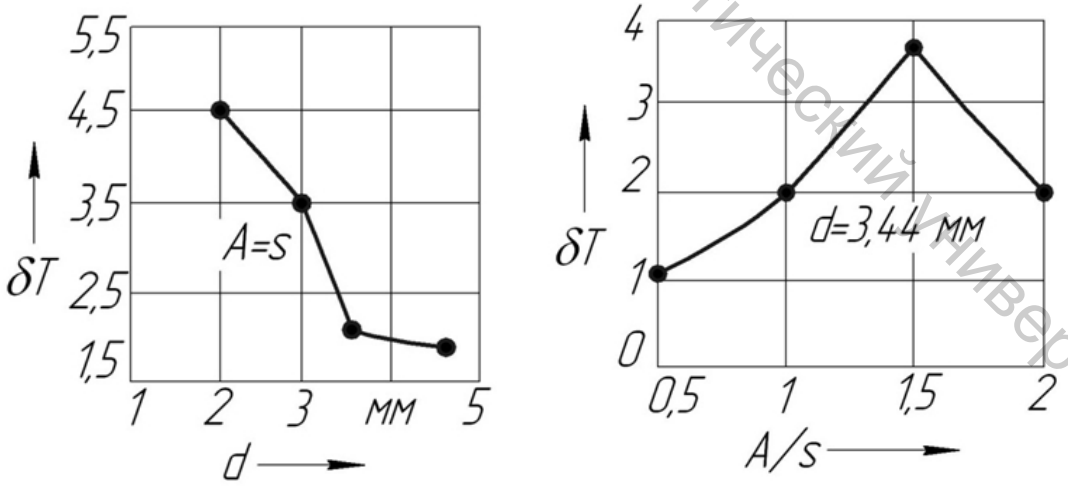


Рисунок 4.33 – Зависимость стойкости резца от параметров режима точения



а б

Рисунок 4.34 – Зависимость относительной стойкости сверл:
а – от диаметра d отверстий, б – от отношения амплитуды A к подаче

Витебский государственный технологический университет

Значительное улучшение обрабатываемости при сверлении прежде всего за счет облегчения процесса удаления стружки и повышения эффективности действия СОЖ достигается путем задания принудительных вибраций инструменту или заготовке в осевом направлении. При обработке отверстий относительно малого (1...4 мм) диаметра наложение осевых вибраций с частотой 75...150 Гц значительно повышает стойкость δT инструмента (рис. 4.34), которая характеризуется количеством отверстий, просверленных до поломки сверла, а также параметры качества обработанной поверхности. Эффективность наложения вибраций зависит от диаметра сверла и относительной амплитуды колебаний. Она повышается при уменьшении диаметра обрабатываемого отверстия, а при $A = (1...1,5)S$ достигает максимума. При вибросверлении параметр шероховатости Ra снижается в 2...3 раза. Кроме того, значительно уменьшается увод (искривление оси) отверстия.

Особые затруднения в производственных условиях вызывает сверление глубоких отверстий. Для удаления сгружки при обычном сверлении приходится периодически прерывать процесс и выводить сверло. Вибросверление глубоких отверстий обеспечивает надежное дробление и вынос стружки из обрабатываемого отверстия. Его лучше выполнять не стандартным спиральным сверлом, а инструментом, показанным на рисунке 4.35 (особенно при обработке отверстий небольшого диаметра). В данном случае СОЖ подается через внутренний и боковые каналы в сверле. Для вибросверления отверстий диаметром до 10 мм и глубиной до 200 мм можно рекомендовать следующее: применять подачи, в 1,2...1,5 раза превышающие подачи при обычном сверлении; скорости резания выбирать такие же, как при обычном сверлении, с учетом материала инструмента и заготовки; отношение частоты f вибраций к частоте вращения $n_з$ заготовки (или сверла) следует принимать 17:8 или 19:8 при частоте вращения заготовки до 15 об/с и 9:8 или 11:8 при большей частоте вращения; амплитуду вибраций $2A$ для сверления отверстий глубиной 5...8 диаметров следует выбирать в пределах $(1...2)S$, а для отверстий глубиной более 8 диаметров – в пределах $(2...3)S$.

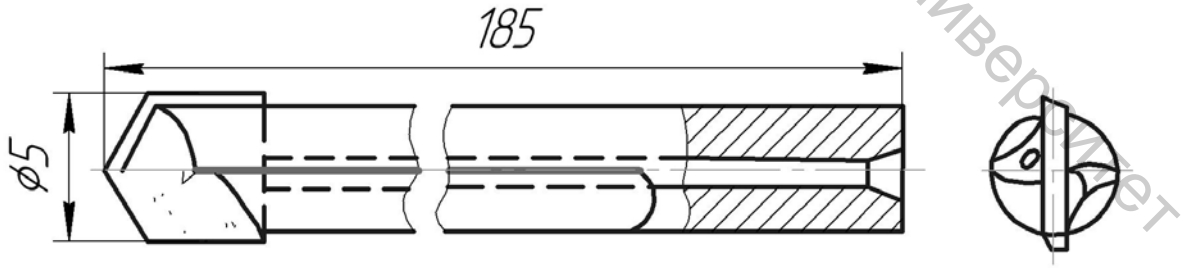


Рисунок 4.35 – Сверло с напайкой из твердого сплава для вибросверления глубоких отверстий малого диаметра

Витебский государственный технологический университет

Наложение ультразвуковых колебаний на инструмент при развертывании и зенкеровании отверстий в заготовках из жаропрочных сталей, титановых и алюминиевых сплавов снижает силы резания в 1,5...2 раза, повышает стойкость инструмента в 2 раза и производительность обработки отверстий в 1,5...2 раза.

Ультразвуковое нарезание резьб в заготовках из труднообрабатываемых материалов также уменьшает силы резания в 1,5...2 раза, исключает срывы ниток резьбы и заклинивание метчиков, повышает производительность резьбонарезания (в 2...4 раза) и точность получаемой резьбы. Улучшается также качество поверхности профиля резьбы. Колебания при нарезании резьбы направлены вдоль оси метчика, но могут быть и крутильными. Последние, правда, менее эффективны.

Воздействие вибраций значительно улучшает показатели абразивной обработки. Для улучшения процессов шлифования и заточки используют колебания как низких, так и высоких (ультразвуковых) частот. Направление низкочастотных колебаний совпадает с образующей рабочей поверхности шлифовального круга (т.е. с осью вращения круга), а ультразвуковые колебания могут быть как осевыми, так и радиальными (т.е. перпендикулярными к обработанной поверхности). При шлифовании с вибрациями улучшается процесс самозатачивания круга, повышается производительность, уменьшается опасность прижогов и уменьшается значение параметра шероховатости. Силовое ограничение производительности при шлифовании с радиальными ультразвуковыми (20 кГц) вибрациями зависит от амплитуды колебаний. Так, при увеличении амплитуды колебаний от 5 до 30 мкм значение коэффициента режущей способности $K_{реж}$ возрастает в 1,5 раза.

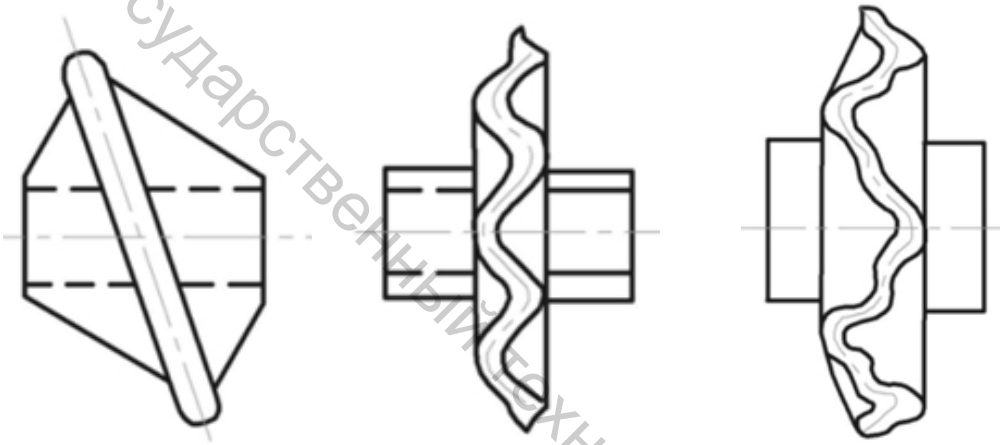
При алмазном хонинговании с наложением круговых вибраций производительность процесса существенно возрастает с увеличением частоты и амплитуды колебаний (при частоте колебаний 12,5 Гц и амплитуде 3 мм производительность увеличивается в 2,5 раза, а конусность хонингуемого отверстия остается такой же, как и при обычном хонинговании).

При суперфинишировании с наложением дополнительных ультразвуковых колебаний, направленных перпендикулярно к обрабатываемой поверхности, производительность по сравнению с обычным процессом увеличивается в 2 раза и более, возрастает выход годной продукции, уменьшается чувствительность к разбросу твердости брусков. Шероховатость поверхности соответствует параметру Ra = 0,02...0,12 мкм при исходном значении Ra = 0,2...1,25 мкм, причем Ra исходной поверхности оказывает незначительное влияние на параметр Ra, полученный после вибросуперфинишированиия. Лучше, чем при обычном суперфинишировании, исправляются погрешности формы (волнистость, огранка). Обычно суперфиниширование с ультразвуковыми колебаниями осу-

Витебский государственный технологический университет

ществляют в два этапа. На втором (отделочном) этапе ультразвуковые колебания отключают и уменьшают давление бруска.

Наложение вибраций при обработке способами ППД преследует одну из следующих целей: создание регулярного или нерегулярного микрорельефа поверхности с заданными характеристиками (глубина и ширина канавок, относительная несущая поверхность); интенсификация процесса пластического деформирования материала заготовки, чтобы при меньших силах достигнуть требуемой микрогеометрии поверхности и степени упрочнения материалов. Заданный микрорельеф может быть получен и без наложения вибраций с помощью фасонных роликов (рис. 4.36). Параметры выдавливаемых канавок (ширина $b_{кан}$ и глубина $h_{кан}$) зависят от силы прижима P инструмента, диаметра шара $d_{шар}$ и диаметра заготовки $D_з$, как это показано на рисунке 4.37.



а б в

Рисунок 4.36 – Ролики для образования микрорельефа на поверхности вибрационной отделочно-упрочняющей обработки ППД (без наложения вибраций):
А – наклонный; б – синусоидальный; в – косинусоидальный

Вторая из указанных выше целей виброобработки способами ППД достигается наложением ультразвуковых колебаний в направлении, перпендикулярном к обрабатываемой поверхности. Это рационально при обработке: заготовок из инструментальных и высоколегированных сталей (У8, У12, 12Х13, ШХ15 и др.) после термической обработки; заготовок и инструментов из твердых сплавов (ВК8, ВК15, ВКЗО); заготовок большого диаметра и заготовок малой жесткости; заготовок с тонкими гальваническими покрытиями; поверхностей сложной формы (когда копиром может служить сама обрабатываемая поверхность).

Витебский государственный технологический университет

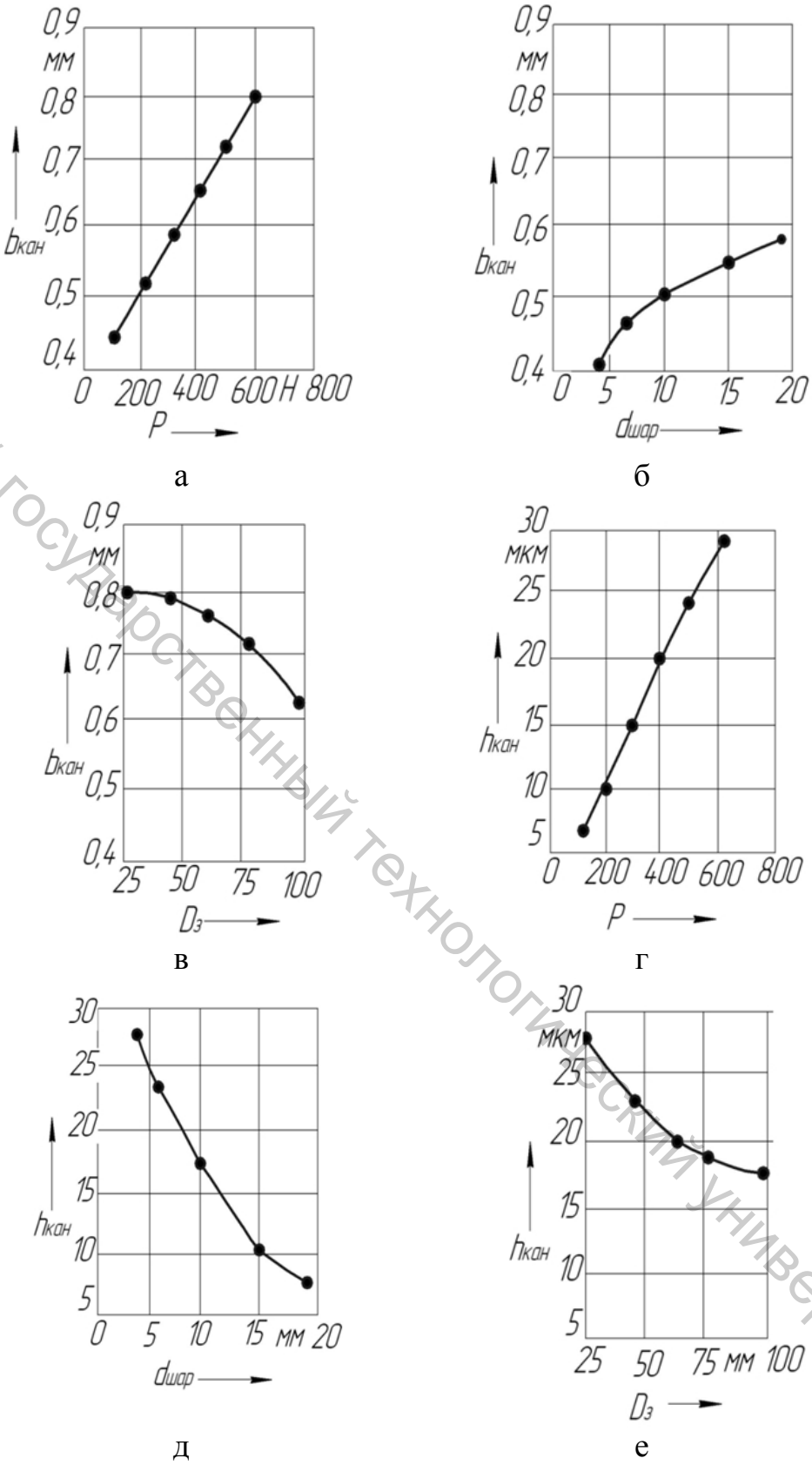


Рисунок 4.37 – Зависимость вершины и глубины канавки от параметров режима виброобкатывания титанового сплава ВТ1-1

Витебский государственный технологический университет

Наложение ультразвуковых вибраций при обработке способами ППД в десятки раз увеличивает скорость пластической деформации, в 3...9 раз – давление в зоне контакта при той же силе прижима инструмента к поверхности, что и при обычном ППД.

4.6 Вопросы для самоконтроля

1. Опишите процессы пластического деформирования подповерхностного слоя заготовки при воздействии режущего клина.
2. Изобразите схему зон пластического деформирования и напряжений при резании лезвийным инструментом.
3. Изобразите схему формирования остаточных напряжений в подповерхностном слое при шлифовании.
4. Какое влияние оказывает нестационарное и неравномерное температурное поле в подповерхностном слое при шлифовании?
5. Дайте определение понятию «прижог».
6. Какие Вы знаете виды прижогов?
7. Перечислите группы причин, обусловливающие шероховатость обработанной поверхности.
8. Изобразите схему формирования «геометрической» шероховатости при точении.
9. Изобразите схему формирования «геометрической» шероховатости при торцовом фрезеровании.
10. Опишите характер влияния скоростей резания при лезвийной обработке на высоту неровностей обработанной поверхности.
11. Опишите характер влияния подач при лезвийной обработке на высоту неровностей обработанной поверхности.
12. Опишите характер влияния твердости заготовки на высоту неровностей обработанной поверхности.
13. Как влияет затупление инструмента на величину шероховатости поверхности?
14. Какое влияние оказывают вибрации при обработке на шероховатость поверхности?
15. Как влияет на шероховатость обработанной поверхности зернистость шлифовального круга?
16. Изобразите зависимости времени выхаживания и дисбаланса шлифовального круга на параметр шероховатости.
17. Что оказывает влияние на высотные параметры шероховатости, образующейся при обработке способами ППД?
18. Изобразите графики зависимости нормальной силы и давления в зоне контакта на параметр Ra при обработке ППД материалов разной твердости.

Витебский государственный технологический университет

19. Изобразите графики зависимости числа проходов и продольной подачи на параметр Ra при обработке ППД материалов разной твердости.

20. Какое влияние оказывает параметр шероховатости исходной поверхности на шероховатость при обработке материалов способами ППД.

21. Какое влияние оказывает твердость материала заготовки на шероховатость при обработке материалов способами ППД.

22. Как влияет на шероховатость поверхности направление пластического деформирования по отношению к направлению предшествующей обработки?

23. Какими показателями характеризуется состояние подповерхностного слоя?

24. Как влияют на степень и глубину упрочнения скорость резания и подача при механической обработке?

25. Как влияют на степень и глубину упрочнения передний угол и радиус скругления режущего лезвия?

26. Как на упрочнение поверхности влияет износ инструмента по задней поверхности?

27. Охарактеризуйте влияние на степень и глубину упрочнения марки инструментального материала.

28. Какова особенность формирования подповерхностного слоя при шлифовании закаленной стали?

29. Опишите зависимости степени и глубины упрочнения от условий обработки способами ППД.

30. Как влияют на степень и глубину упрочнения подачи и скорости обкатывания и алмазного выглаживания?

31. Запишите выражение для определения объемной производительности при шлифовании.

32. Изобразите зависимость глубины дефектного слоя (прижога) от интенсивности удаления материала заготовки при шлифовании «острым» и «затупленным» кругами.

33. Запишите выражение для теплового ограничения при шлифовании.

34. Изобразите схему силового и теплового ограничений производительности при шлифовании.

35. В чем суть граничного алгоритма управления съемом припуска по каналу радиальной подачи?

36. В чем суть ступенчатого алгоритма управления съемом припуска по каналу?

37. Изобразите схему системы реализации граничного алгоритма управления съемом припуска при круглом врезном шлифовании.

38. Опишите алгоритм работы СЛУ системы автоматического управления циклом съема припуска при круглом врезном шлифовании.

Витебский государственный технологический университет

39. Опишите способы подачи СОЖ в зону шлифования.

40. Опишите достоинства кругов с прерывистой рабочей поверхностью.

41. Каков характер изменения температуры в зоне сплошного и прерывистого шлифования?

42. Назовите причины вынужденных колебаний в процессе резания.

43. Назовите причины возбуждения автоколебаний.

44. Изобразите зависимость амплитуды продольных автоколебаний стола с механическим приводом от скорости его движения.

45. Как влияет увеличение жесткости привода и вязкости смазочного материала на амплитуду автоколебаний?

46. Опишите влияние условий обработки на амплитуда автоколебаний при точении.

47. Опишите влияние режимов и условий обработки на амплитуду автоколебаний при шлифовании.

48. Изобразите схему формирования волнистости при шлифовании.

49. Как ослабить вынужденные колебания станка, передаваемые через фундамент от внешних источников?

50. Как снизить вибрации, вызванные работой собственных механизмов и приводов станка?

51. Что рекомендуется для повышения плавности перемещения элементов станков?

52. Изобразите графики расположения областей устойчивости в зависимости от параметров и условий точения и фрезерования.

53. Как зависит устойчивость процессов точения и растачивания на токарном станке от ориентации силы резания?

54. Как зависит устойчивость процесса растачивания от ориентации силы резания и оси эллипса жесткости оправки?

55. Как для повышения устойчивости процесса точения сместить точку приложения силы резания относительно нейтральной оси изгиба державки резца?

56. Изобразите схему динамического гасители колебаний для расточных борштанг.

57. Изобразите схему ударного гасителя колебаний.

58. Изобразите схему контактно-ударного виброгасителя.

59. Как создать условия для «самоперерезания» волн при шлифовании?

60. Опишите область применения и особенности использования фрез, протяжек и разверток с неравномерным шагом.

61. Для чего могут использоваться низкочастотные и ультразвуковые механические колебания?

62. По каким признакам систематизируются осцилляторы?

Витебский государственный технологический университет

63. Изобразите график зависимости минимальной амплитуды колебаний, обеспечивающей стружкодробление, от подачи при точении.

64. Изобразите график зависимости минимальной амплитуды колебаний, обеспечивающей стружкодробление, от параметров режима точения и резца.

65. Изобразите схему автоколебательного вибросуппорта.

66. Как влияют на обрабатываемость высоколегированных нержавеющих и жаропрочных сталей высокочастотные тангенциальные вибрации?

67. Как влияет задание вибраций инструменту или заготовке в осевом направлении при сверлении?

68. Опишите преимущества и особенности процесса вибросверления глубоких отверстий.

69. Как влияет наложение ультразвуковых колебаний на инструмент при развертывании и зенкеровании?

70. Опишите преимущества и особенности ультразвукового нарезания резьб.

71. Каковы преимущества и особенности наложения вибраций при шлифовании.

72. Каковы особенности использования вибраций при хонинговании и суперфинишировании?

73. Какие цели преследуют при наложении вибраций при обработке способами ППД?

Витебский государственный технологический университет

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Махаринский, Е. И. Основы теории проектирования технических систем : учебное пособие для студентов вузов / Е. И. Махаринский, Ю. Е. Махаринский, В. И. Ольшанский, Н. В. Беляков ; УО «ВГТУ». – Витебск, 2009. – 354 с.

2. Беляков, Н. В. Синтез технологических процессов : учебное пособие / Н. В. Беляков, Ю. Е. Махаринский, В. И. Ольшанский, В. А. Горохов ; УО «ВГТУ». – Витебск, 2017. – 472 с.

3. 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.

4. Основы технологии машиностроения и формализованный синтез технологических процессов : учебник. В 2 ч. Ч. 1 / В. А. Горохов [и др.]; под ред. В. А. Горохова. – 3-е изд., перераб. и доп. – Старый Оскол: ТНТ, 2019. – 496 с.

5. Основы технологии машиностроения и формализованный синтез технологических процессов : учебник. В 2 ч. Ч. 2 / В. А. Горохов [и др.]; под ред. В. А. Горохова. – 3-е изд., перераб. и доп. – Старый Оскол: ТНТ, 2019. – 576 с.

6. Цветков, В. Д. Система автоматизированного проектирования технологических процессов / В. Д. Цветков. – Москва : Машиностроение, 1972. – 240 с.

7. Суслов, А. Г. Научные основы технологии машиностроения / А. Г. Суслов, А. М. Дальский. – Москва : Машиностроение, 2002. – 684 с.

8. Наукоемкие технологии в машиностроении / А. Г. Суслов [и др.]; под ред. А. Г. Суслова. – Москва : Машиностроение, 2012. – 528 с.

9. Схиртладзе, А. Г. Метрология, стандартизация и сертификация / А. Г. Схиртладзе. – Старый оскол : ТНТ, 2019. – 540 с.

10. Воронцова, А. Н. Сборник заданий по метрологии и техническим измерениям / А. Н. Воронцова. – Старый Оскол : ТНТ, 2019. – 104 с.

11. Колесников, К. С. Технологические основы обеспечения качества машин / К. С. Клесников, Г. Ф. Баландин, А. М. Дальский. – Москва : Машиностроение, 1990. – 256 с.

12. Рыжов, Э. В. Технологическое обеспечение эксплуатационных свойств деталей машин / Э. В. Рыжов. – Москва : Машиностроение, 1979. – 176 с.

Витебский государственный технологический университет

13. Федоров, В. П. Технологическое обеспечение и повышение эксплуатационных свойств деталей и их соединений / В. П. Фёдоров [и др.]. – Москва : Машиностроение, 2000. – 480 с.

14. Сулима, А. Н. Поверхностный слой и эксплуатационные свойства деталей машин / А. Н. Сулима. – Москва : Машиностроение, 1988. – 240 с.

15. Суслов, А. Г. Технологическое обеспечение и повышение эксплуатационных свойств деталей и их соединений / А. Г. Суслов, В. П. Федоров, О. А. Горленко. – Москва : Машиностроение, 2006. – 448 с.

16. Рыжов, Э. В. Технологические методы повышения износостойкости деталей машин / Э. В. Рыжов. – Киев : Наукова думка, 1984. – 272 с.

17. Технологические методы обеспечения надежности деталей машин : учебник / И. М. Жарский [и др.]. – Минск : Вышэйшая школа, 2010. – 336 с.

18. Бойцов, В. Б. Технологические методы повышения прочности и долговечности / В. Б. Бойцов, А. О. Чернявский. – Москва : Машиностроение, 2005. – 128 с.

19. Допуски и посадки : справочник. В 2 ч. Ч. I / В. Д. Мягков [и др.]. – 6-е изд., перераб. и доп. – Ленинград : Машиностроение. Ленингр. отделение, 1982. – 543 с.

20. Допуски и посадки : справочник. В 2 ч. Ч II / В. Д. Мягков [и др.]. – 6-е изд., перераб. и доп. – Ленинград : Машиностроение, 1982. – 448 с.

21. Каменев, А. Ф. Технические системы : закономерности развития / А. Ф. Каменев. – Ленинград : Машиностроение, 1985. – 216 с.

22. Контрольно-измерительные приборы и инструменты : учебник для нач. проф. образования / С. А. Зайцев [и др.]. – Москва : Издательский центр «Академия», 2005. – 464 с.

23. Справочник по производственному контролю в машиностроении / под ред. А. К. Кутая. – Ленинград : Машиностроение, 1974. – 976 с.

24. Справочник технолога-машиностроителя. В 2 т. Т. I / под ред. А. Г. Косиловой и Р. К. Мещерякова. – 4-е изд., перераб. и доп. – Москва : Машиностроение, 1986. – 656 с.

25. Справочник технолога-машиностроителя. В 2 т. Т. II / под ред. А. Г. Косиловой и Р. К. Мещерякова. – 4-е изд., перераб. и доп. – Москва : Машиностроение, 1986. – 496 с.

26. Емельянов, С. Г. Нормирование точности в машиностроении / С. Г. емельянов. – Старый оскол : ТНТ, 2019. – 440 с.

27. Машиностроение. Энциклопедия. Т. III. технология изготовления деталей машин / А. М. Дальский [и др.]. – Москва : Машиностроени, 2000. – 840 с.

Витебский государственный технологический университет

28. Суслов, А. Г. Качество поверхностного слоя деталей машин / А. Г. Суслов. – Москва : Машиностроение, 2000. – 320 с.

29. Гладков, К. М. Технология текстильного машиностроения / К. М. Гладков, Е. И. Глущенко, Б. И. Лившиц. – Москва : Машиностроение, 1966. – 439 с.

30. Маслов, Д. П. Технология машиностроения / Д. П. Маслов, В. В. Данилевский, В. В. Сасов. – Ленинград : Машгиз, 1957. – 424 с.

31. Каратыгин, А. М. Технология полиграфического машиностроения / А. М. Каратыгин [и др.]. – Москва : Книга, 1967. – 552 с.

32. 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.

33. Малкин, Я. А. Основы технологии механической обработки деталей машин / Я. А. Малкин. – Москва : Машгиз, 1961. – 199 с.

34. Гурин, Ф. В. Технология автотракторостроения / Ф. В. Гурин, В. Д. Клепиков, В. В. Рейн. – Москва : Машиностроение, 1971. – 344 с.

35. Яхин, А. Б. Технология приборостроения / А. Б. Яхин, В. П. Ефимов. – Москва : Оборонгиз, 1955. – 379 с.

36. Якобсон, М. О. Технология станкостроения / М. О. Якобсон. – Москва : Машиностроение, 1966. – 475 с.

37. Эттель, А. В. Технология сельскохозяйственного машиностроения / А. В. Эттель. – Москва : Машгиз, 1961. – 287 с.

38. Картавов, С. А. Технология машиностроения. Специальная часть : учеб. пособие для машиностроительных специальностей вузов / С. А. Картавов. – Киев : Вища школа, 1974. – 272 с.

39. Технология машиностроения. Специальная часть / Б. Л. Беспалов [и др.]. – Москва : Машиностроение, 1965. – 456 с.

40. Технология вагоностроения. Ремонт и надежность вагонов : учебник для техникумов по специальности «Вагоностроение» / Т.К. Батюшин [и др.]. – Москва : Машиностроение, 1990. – 360 с.

41. Данилевский, В. В. Технология машиностроения : учебник для техникумов / В. В. Данилевский. – 5-е изд., перераб и доп. – Москва : Высшая школа, 1984. – 416 с.

42. Ковшов, А. Н. Технология машиностроения : учебник для студентов машиностроительных специальностей вузов / А. Н. Ковшов. – Москва : Машиностроение, 1987. – 320 с.

43. Мосталыгин, Г. П. Технология машиностроения : учебник / Г. П. Мосталыгин, Н. Н. Толмачевский. – Москва : Машиностроение, 1990. – 288 с.

44. Воробьев, Л. Н. Технология машиностроения и ремонт машин : учебник для вузов / Л. М. Воробьев. – Москва : Высшая школа, 1981. – 344 с.

45. Проектирование технологии : учебник для студентов машиностроительных специальностей вузов / И. М. Баранчукова [и др.] ; под

Витебский государственный технологический университет

общ. ред. Ю. М. Соломенцева. – Москва : Машиностроение, 1990. – 461 с.

46. Технология машиностроения (специальная часть) : учебник для машиностроительных специальностей вузов / А. А. Гусев [и др.]. – Москва : Машиностроение, 1986. – 480 с.

47. 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.

48. Колесов, И. М. Основы технологии машиностроения : учебник для машиностроительных спец. вузов / И. М. Колесов. – Москва : Высшая школа, 1999. – 591 с.

49. 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.

50. Маталин, А. А Технология машиностроения / А. А. Маталин. – Ленинград : Машиностроение, 1985. – 464 с.

51. Маталин, А. А Технология механической обработки / А. А. Маталин. – Ленинград : Машиностроение, 1977. – 464 с.

52. 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.

53. Ракович, А. Г. Основы автоматизации проектирования технологических приспособлений / А. Г. Ракович ; под ред. Е. А. Стародетко. – Минск : Наука и техника, 1985. – 285 с.

54. Автоматизация проектирования ТП и средств оснащения / под ред. А. Г. Раковича. – Минск : Институт технической кибернетики НАН Беларуси, 1997. – 276 с.

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

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

57. 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.

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

59. Колыбенко, Е. И. Системные знания теории базирования в машиностроении / Е. И. Колыбенко // Вестник машиностроения. – 2005. – № 10, 11.

Витебский государственный технологический университет

60. 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.

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

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

63. 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.

64. 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.

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

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

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

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

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

70. 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.

71. 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.

72. Махаринский, Е. И. О теории базирования при механической обработке / Е. И. Махаринский, Ю. Е. Махаринский, Н. В. Беляков // СТИН. – № 4. – 2005. – С. 29–32.

73. 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.

74. Схиртладзе, А. Г. Основы механосборочного производства / А. Г. Схиртладзе. – Старый Оскол : ТНТ, 2019. – 292 с.

Витебский государственный технологический университет

75. Старостин, В. Г. Формализация проектирования процессов обработки резанием / В. Г. Старостин, В. Е. Лелюхин. – Москва : Машиностроение, 1986. – 136 с.

76. Технология машиностроения. Практикум : учебное пособие для студентов учреждений высшего образования по машиностроительным спец. / А. А. Жолобов [и др.]; под ред. А. А. Жолобова. – Минск: Вышэйшая школа, 2015. – 335 с.

77. Схиртладзе, А. Г. Производство деталей металлорежущих станков / А. Г. Схиртладзе. – Старый Оскол : ТНТ, 2019. – 592 с.

78. Клименков, С. С. Проектирование и производство заготовок : учебник для вузов / С. С. Клименков. – Витебск : УО «ВГТУ», 2004. – 385 с.

79. Клименков, С. С. Современные технологии в машиностроении и приборостроении : учебник / С. С. Клименков ; ВГТУ. – Витебск, 2017. – 311 с.

80. Схиртладзе, А. Г. Технологические процессы в машиностроении / А. Г. Схиртладзе. – Старый Оскол : ТНТ, 2019. – 524 с.

81. Обработка заготовок деталей машин : учебное пособие для студентов учреждений высшего образования по машиностроительным специальностям / А. А. Миранович [и др.] ; под ред. Ж. А. Мрочека. – Минск : Вышэйшая школа, 2014. – 172 с.

82. Современные методы и технологии создания и обработки материалов = Advancedmethodsandtechnologiesofmaterialsdevelopment-andprocessing : сборник научных трудов : в 3 кн. Кн. 2 : Технологии и оборудование механической и физико-технической обработки / ГНУ ФТИ НАНБ. – Минск : ФТИ НАН Беларуси, 2018. – 275 с.

83. Технология изготовления деталей на станках с ЧПУ : учебное пособие / Ю. А. Бондаренко [и др.]. – 4-е изд., перераб. и доп. – Старый Оскол : ТНТ, 2018. – 291 с.

84. Емельянов, С. Г. Размерный анализ в машиностроении / С. Г. Емельянов. – Старый Оскол : ТНТ, 2019. – 332 с.

85. Стрелец, А. А. Размерные расчеты в задачах оптимизации конструкторско-технологических решений / А. А. Стрелец, В. А. Фирсов. – Москва : Машиностроение, 1988. – 120 с.

86. Солонин, С. И. Расчет сборочных и технологических размерных цепей / С. И. Солонин, И. С. Солонин. – Москва : Машиностроение, 1980. – 110 с.

87. Соколов, В. О. Размерный анализ технологических процессов в автоматизированном производстве / В. О. Соколов. – Старый Оскол : ТНТ, 2019. – 220 с.

88. Цепи размерные. Расчет технологических размерных цепей : методические рекомендации. МР 43-82 / В. В. Матвеев [и др.]. – Москва : ВНИИНМАШ, 1982. – 225 с.

Витебский государственный технологический университет

89. Размерный анализ технологических процессов обработки / И. Г. Фридлендер [и др.] ; под общ. ред. И. Г. Фридлендера. – Ленинград : Машиностроение, 1987. – 141 с.

90. Мордвинов, Б. С. Расчет технологических размеров и допусков при проектировании технологических процессов механической обработки / Б. С. Мордвинов, Е. С. Огурцов. – Омск : Изд-во ОмПИ, 1975. – 160 с.

91. Брук, С. И. Технологические размерные расчеты / С. И. Брук, Б. И. Лившиц, В. Н. Гостев. – Ленинград : Машиностроение, 1946. – 181 с.

92. Быков, Ю. М. Анализ точности и стабильности процессов / Ю. М. Быков. – Старый Оскол: ТНТ, 2019. – 96 с.

93. Быков, Ю. М. Статистический анализ стабильности и точности процессов на основе контрольных карт. – Старый Оскол : ТНТ, 2019. – 104 с.

94. Драчев, О. И. Статистические методы управления качеством / О. И. Драчев, А. А. Жилин. – Старый Оскол : ТНТ, 2019. – 148 с.

95. Горохов, В. А. Проектирование механосборочных участков и цехов : учебник / В. В. Горохов, Н. В. Беляков, А. Г. Схиртладзе ; под ред. д.т.н. проф. В. А. Горохова. – Минск : Новое знание; Москва : ИНФРА-М, 2016. – 540 с.

96. Беляков, Н. В. Проектирование технологических процессов сборки машин : учебное пособие / Н. В. Беляков, В. А. Горохов ; под ред. В. А. Горохова ; УО «ВГТУ». – Витебск, 2017. – 97 с.

97. Горохов, В. А. Технологические процессы сборки машин и изготовления деталей : учебник / В. А. Горохов, Н. В. Беляков ; под ред. В. А. Горохова. – Старый Оскол : ТНТ, 2017. – 576 с.

98. Горохов, В. А. Основы технологии машиностроения : лабораторный практикум / В. А. Горохов, Н. В. Беляков, Ю. Е. Махаринский. – Минск : Новое знание ; Москва : ИНФРА-М, 2013. – 446 с.

99. Беляков, Н. В. Основы технологии машиностроения : лабораторный практикум / Н. В. Беляков, В. А. Горохов, Ю. Е. Махаринский ; УО «ВГТУ». – Витебск, 2012. – 351 с.

100. Горохов, В. А. Материалы и их технологии: учебник : в 2 ч. Ч. 1 / В. А. Горохов, Н. В. Беляков, А. Г. Схиртладзе; под ред. В. А. Горохова. – Минск: Новое знание ; Москва : ИНФРА-М, 2016. – 588 с.

101. Горохов, В. А. Материалы и их технологии: учебник : в 2 ч. Ч. 2 / В. А. Горохов, Н. В. Беляков, А. Г. Схиртладзе; под ред. В. А. Горохова. – Минск: Новое знание ; Москва : ИНФРА-М, 2016. – 532 с.

102. Финишная обработка поверхностей при производстве деталей : монография / С. А. Клименко [и др.] ; под общ.ред. С. А. Чижика и М. Л. Хейфеца ; Институт сверхтвердых материалов имени В. Н. Бакуля. – Минск : Беларуская навука, 2017. – 376 с.

Витебский государственный технологический университет

103. Григорьянц, А. Г. Технологические процессы лазерной обработки : учебное пособие / А. Г. Григорьянц, М. А. Казарян, Н. А. Лябин. – Москва : Физматлит, 2005. – 312 с.

104. Синдеев, Ю. Г. Гальванические покрытия / Ю. Г. Синдеев. – Ростов на Дону : феникс, 2000. – 256 с.

105. Ажогин, Ф. Ф. Гальванотехника / Ф. Ф. Ажогин, М. А. Беленький, И. Е. Галл. – Москва : Металлургия, 1987. – 736 с.

106. Восстановление деталей машин : справочник / Ф. И. Пантелеенко, В. П. Лялякин, В. П. Иванов. – Москва : Машиностроение, 2003. – 672 с.

107. Тушинский, Л. И. Методы исследований материалов: Структура, свойства и процессы нанесения неорганических покрытий / Л. И. Тушинский, А. В. Плохов, О. А. Токарев. – Москва : Мир, 2004. – 384 с.

108. Удалов, Ю. П. Технология неорганических порошковых материалов и покрытий функционального назначения / Ю. П. Удалов [и др.]. – Санкт-Петербург : Янус, 2001. – 320 с.

109. Бобров, Г. В. Нанесение неорганических покрытий / Г. В. Бобров. – Москва : Интермет Инжиниринг, 2004. – 624 с

110. Балдаев Л. Х. Газотермическое напыление : учебное пособие / Л. Х. Балдаев. – Москва : Маркет ДС, 2007. – 344 с.

111. Вакуумная техника : справочник / К. Е. Демихов, Ю. В. Панфилов, Н. К. Никулин. – Москва : Машиностроение, 2009. – 590 с.

112. Соснин, Н. А. Плазменные технологии. Руководство для инженеров / Н. А. Соснин, С. А. Ермаков, П. А. Тополянский. – Санкт-Петербург : Издательство политехн. ин-та, 2008. – 406 с.

113. Лащенко, Г. И. Плазменне упрочнение и напыление / Г. И. Лащенко. – Киев : Экотехнология, 2003. – 64 с.

114. Инженерия поверхности деталей / А. Г. Суслов [и др.]. – москва : машиностроение, 2008. – 320 с.

115. Ящерицын, П. И. Технологическая наследственность в машиностроении / П. И. Ящерицын, Э. В. Рыжов, В. И. Аверченков. – Минск : Наука и техника, 1977. – 256 с.

116. Дальский, А. М. Технологическая наследственность в машиностроительном производстве / А. М. Дальский, Б. М. Базров, А. С. Васильев. – Москва : Изд-во МАИ, 2000. – 364 с.

117. Кузнецов, В. П. Самоорганизация в технических системах / В. П. Кузнецов, М. А. Раков. – Киев : Наукова думка, 1987. – 200 с.

118. Князева, С. И. Законы эволюции и самоорганизация сложных систем / С. И. Князева, С. П. Курдюшов. – Москва : Наука, 1994. – 325 с.

119. Ciberleninka [Электронный ресурс] : самоорганизация в технологии машиностроения / Сайт производителя. – Электрон. текстовые данные. – Режим доступа : https://cyberleninka.ru/article/n/samoorganizatsiya-v-tehnologii-mashinostroeniya. – Дата доступа: 28.01.2020.

Витебский государственный технологический университет

120. Кане, М. М. Основы исследований, изобретательства и инновационной деятельности в машиностроении: учебник / М. М. Кане. – Минск : Вышэйшая школа, 2018. – 366 с.

121. Корнеев, С. В. Основы научных исследований. Эксперимент. Том 1 / С. В. Корнеев. – Старый Оскол : ТНТ, 2019. – 336 с.

122. Корнеев С. В. Основы научных исследований. Эксперимент. Том 2 / С. В. Корнеев. – Старый Оскол : ТНТ, 2019. – 268 с.

123. Соловьев, В. П. Организация эксперимента / В. П. Соловьев. – Старый Оскол : ТНТ, 2019. – 256 с.

124. Спирин, А. Н. Методы планирования и обработки результатов инженерного эксперимнета : конспект лекций / Н. А. Спирин, В. В. Лавров. – Екатеринбург : ГОУ ВПУ УГТУ-УПИ, 2004. – 257 с.

125. Адлер, Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю. П. Адлер, Е. В. Маркова, Ю. В. Грановский. – Москва : Машиностроение, 1976. – 278 с.

126. Алабин, М. А. Корреляционно-регрессионный анализ статистических данных в двигателестроении / М. А. Алабин, А. Б. Ройтман. – Москва : Машиностроение, 2010. – 124 с.

127. Мещеряков, В. В. Задачи по статистике и регрессионному анализу с MATLAB / В. В. Мещеряков. – Москва : Диалог-Мифи, 2015. – 448 с.

128. Риордан, Дж. Введение в комбинаторный анализ / Дж. Риордан. – Москва : Машиностроение, 2012. – 195 с.

129. Романовский, В. И. Избранные труды. Том 2. Теория вероятностей, статистика и анализ / В. И. Романовский. – Москва : Машиностроение, 2011. – 961 с.

130. Соколов, Г. А. Введение в регрессионный анализ и планирование регрессионных экспериментов / Г. А. Соколов, Р. В. Сагитов. – Москва : ИНФРА-М, 2010. – 208 с.

131. Такахаси, С. Занимательная статистика. Регрессионный анализ / С. Такахаси. – Москва : Додэка, ДМК Пресс, 2015. – 216 с.

132. Шашков, В. Б. Прикладной регрессионный анализ : учебное пособие / В. Б. Шашков. – Оренбург : ГОУ ВПО ОГУ, 2003. – 363 с.

133. Васильев, А. Н. Нейросетевое моделирование. Принципы. Алгоритмы. Приложения / А. Н. Васильев, Д. А. Тархов. – Санкт-Петербург : Изд-во Политехнического университета, 2009. – 527 с.

134. Осовский, С. Нейронные сети для обработки информации / С. Осовский. – Москва : Финансы и статистика, 2002. – 344 с.

135. Сергеев, А. П. Введение в нейросетевое моделирование : учебное пособие / А. П. Сергеев, Д. А. Тарасов. – Москва : Флинта, 2020. – 128 с.

136. Папандимитриу, Х. Комбинаторная оптимизация. Теория и алгоритмы / Х. Папандимитриу, К. Стейглиц. – Москва : Мир, 1983. – 510 с.

Витебский государственный технологический университет

137. Норенков, И. П. Основы автоматизированного проектирования : учебник для вузов / И. П. Норенков. – Москва : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2000. – 360 с.

138. Левин, В. И. Информационные технологии в машиностроении / В. И. Левин. – Москва : Академия, 2006. – 240 с.

139. Кондаков, А. И. САПР технологических процессов : учебник для студ. высш. учеб. заведений / А. И. Кондаков. – Москва : Издательский центр «Академия», 2007. – 272 с.

140. Музгин, С. С. Автоматизированная система научных исследований в горном деле / С. С. Музгин : Алма-Ата : Наука, 2012. – 127 с.

141. Фомичев, Н. И. Автоматизированные системы научных исследований / Н. И. Фомичев. – Ярославль : ЯрГУ, 2013. – 234 с.

142. Bibliofond [Электронный ресурс] : Автоматизированная система научных исследований / Сайт производителя. – Электрон. текстовые данные. – Режим доступа : https://www.bibliofond.ru/view.aspx?id=578565#text. – Дата доступа: 15.02.2019.

143. Dissercat [Электронный ресурс] : Методы и средства анализа эффективности автоматизированных систем научных исследований на предприятиях стадии / Сайт производителя. – Электрон. текстовые данные. – Режим доступа : https://www.dissercat.com/content/metody-i-sredstva-analiza-effektivnosti-avtomatizirovannykh-sistem-nauchnykh-issledovanii-na. – Дата доступа: 28.01.2020.

144. Scienceforum [Электронный ресурс] : АСНИ / Сайт производителя. – Электрон. текстовые данные. – Режим доступа :https://scienceforum.ru/2020/article/2018018057. – Дата доступа: 18.12.2019.

145. Studbooks [Электронный ресурс] : Автоматизированные системы научных исследований / Сайт производителя. – Электрон. текстовые данные. – Режим доступа : https: //studbooks.net/1386372/ menedzhment/ avtomatizirovannye_ sistemy_upravleniya. – Дата доступа: 23.01.2020.

146. Хейфец, М. Л. Проектирование процессов комбинированной обработки / М. Л. Хейфец. – Москва : машиностроение, 2005. – 272 с.

147. Михайлов, А. Н. Основы синтеза функционально-ориентированных технологий машиностроения / А. Н. Михайлов. – Донецк : Дон НТУ, 2009. – 346 с.

148. Сторожук, О. А. Моделирование и вариантное прогнозирование развития техники. / О. А. Сторожук. – Москва : Машиностроение, 2005. – 252 с.

Витебский государственный технологический университет

Учебное издание

Беляков Николай Владимирович
Горохов Вадим Андреевич
Махаринский Юрий Ефимович
Ольшанский Валерий Иосифович

НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИИ МАШИНОСТРОЕНИЯ

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

В двух частях

Часть 1

Корректор *Т.А. Осипова*
Редактор *Т.А. Осипова*
Компьютерная верстка *Н.В. Беляков*

Подписано к печати 31.05.2021. Формат 60x90 1/16. Усл. печ. листов 19,3.
Уч.-изд. листов 24,4. Тираж 9 экз. Заказ № 117.

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 2014 г.
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя печатных изданий № 3/1497 от 30 мая 2017 г.

Витебский государственный технологический университет