

Министерство образования и науки РФ  
Государственное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
Владимирский государственный университет

В. У. МНАЦАКАНЯН,  
В. В. МОРОЗОВ,  
А. Г. СХИРТЛАДЗЕ,  
В. А. ТИМИРЯЗЕВ

# ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИИ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Учебник  
В двух частях  
Часть 1

Под редакцией доктора технических наук  
профессора В.А. Тимирязева

*Допущено Учебно-методическим объединением вузов по образованию в области автоматизированного машиностроения (УМО АМ) в качестве учебника для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств»*

Владимир 2011

УДК 621.77  
ББК 34.5  
О-75

Рецензенты:

Доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой "Автоматизация  
производства и проектирования в машиностроении" МГОУ

*П.М. Кузнецов*

Доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой "Технология  
газонефтяного машиностроения" РГУ им. И.М. Губкина

*О.А. Новиков*

Печатается по решению редакционного совета  
Владимирского государственного университета

**Основы** технологии машиностроительного производства:  
О-75 учеб. для машиностроит. вузов. В 2 ч. Ч. 1 / В.У. Мнацаканян [и  
др.] ; под ред. В.А. Тимирязева; Владим. гос. ун-т. – Владимир :  
Изд-во Владим. гос. ун-та, 2011. – 274 с.

ISBN 978-5-9984-0092-6 (ч. 1) ISBN 978-5-9984-0091-9

Изложены теоретические основы технологии машиностроения – параметры  
точности деталей и качества машин, вопросы базирования, методы выявления и  
расчета размерных связей в машинах и технологических процессах. Приведены  
примеры расчета размерных цепей с использованием пяти методов достижения  
точности замыкающего звена. Особое внимание уделено вопросам повышения  
точности и производительности обработки на станках путем использования адап-  
тивных систем управления технологическими процессами.

Предназначен для студентов машиностроительных вузов, проходящих обу-  
чение на уровне бакалавров, магистров наук и дипломированных инженеров по  
направлению «Технология, оборудование и автоматизация машиностроительных  
производств».

Табл. 17. Ил. 111. Библиогр. : 35 назв.

УДК 621.77  
ББК 34.5

ISBN 978-5-9984-0092-6 (Ч. 1) © Владимирский государственный  
ISBN 978-5-9984-0091-9 университет, 2011

© Мнацаканян В. У., Морозов В. В.,  
Схиртладзе А. Г., Тимирязев В. А., 2011

## Оглавление

Предисловие .....	5
Глава 1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ .....	7
1.1. Производственный, технологический и вспомогательные процессы в машиностроении .....	7
1.2. Структура технологического процесса .....	8
1.3. Типы производств и их особенности .....	14
Вопросы для самопроверки .....	16
Глава 2. МАШИНА КАК ОБЪЕКТ ПРОИЗВОДСТВА. СЛУЖЕБНОЕ НАЗНАЧЕНИЕ И КАЧЕСТВО МАШИН.....	18
2.1. Исполнительные поверхности машины и связи между ними .....	18
2.2. Виды поверхностей деталей машин. ....	21
2.3. Показатели качества машин и их деталей .....	24
Вопросы для самопроверки .....	34
Глава 3. БАЗИРОВАНИЕ И БАЗЫ В МАШИНОСТРОЕНИИ .....	36
3.1. Типовые схемы базирования деталей и узлов машин .....	36
3.2. Классификация баз .....	43
3.3. Смена баз .....	49
3.4. Принцип единства баз .....	52
3.5. Основы выбора технологических баз .....	53
Вопросы для самопроверки .....	60
Глава 4. РАЗМЕРНЫЕ СВЯЗИ В МАШИНАХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ.....	61
4.1. Конструкторские, технологические и измерительные размерные цепи .....	61
4.2. Погрешность замыкающего звена размерной цепи .....	68
4.3. Изменения параметров качества изделий и их оценка ....	70
4.4. Пять методов достижения точности замыкающего звена размерной цепи .....	83
4.5. Цепной, координатный и комбинированный методы получения и измерения точности размеров деталей машин .....	103
Вопросы для самопроверки .....	108
Глава 5. ДОСТИЖЕНИЕ ТОЧНОСТИ ДЕТАЛЕЙ МАШИН ПРИ ИХ ИЗГОТОВЛЕНИИ .....	110
5.1. Коэффициенты уточнения и передаточные отношения технологических систем .....	110

5.2. Три этапа настройки технологической системы на точность .....	111
5.3 Погрешность установки и пути ее уменьшения.....	114
5.4. Статическая настройка технологической системы .....	122
5.5. Образование размера динамической настройки при возникновении упругих перемещений в технологической системе.....	125
5.6. Вибрации в технологической системе и пути их уменьшения.....	131
5.7. Отклонения, обусловленные тепловыми деформациями в технологической системе и износом режущего инструмента .....	135
5.8. Уменьшение влияния перераспределения остаточных напряжений на точность обработки.....	146
Вопросы для самопроверки.....	154
<b>Глава 6. УПРАВЛЕНИЕ ТОЧНОСТЬЮ ОБРАБОТКИ НА СТАНКАХ .....</b>	<b>156</b>
6.1. Настройка и поднастройка технологической системы ...	156
6.2. Автоматический контроль точности деталей на рабочем месте .....	166
6.3. Управление точностью на этапе установки и статической настройки.....	171
6.4. Управление точностью и производительностью обработки на станках в процессе резания.....	183
6.5. Выбор источников информации в системах управления процессом обработки на станках .....	203
Вопросы для самопроверки.....	213
<b>Глава 7. РАСЧЕТ ПРИПУСКОВ И ОПЕРАЦИОННЫХ РАЗМЕРОВ. МЕТОДЫ ПОЛУЧЕНИЯ ЗАГОТОВОК ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН .....</b>	<b>215</b>
7.1. Расчетноаналитический и табличный методы определения припусков.....	215
7.2. Определение численных значений составляющих припуска .....	224
7.3. Определение погрешности установки заготовок на станках .....	238
7.4. Выявление и расчет технологических размерных связей при назначении припусков.....	255
Вопросы для самопроверки.....	269
<b>БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК .....</b>	<b>273</b>

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Современную деятельность человека невозможно представить без машин. Машины выполняют разнообразные технологические процессы по переработке природных ресурсов для создания необходимых материальных благ, по оказанию помощи в труде, транспортных операциях, удовлетворении материальных и духовных запросов. Потребность человеческого общества в различных видах продукции, производимой с помощью машин, определяет необходимость создания и совершенствования машин различного служебного назначения. Машиностроение является главным технологом всех отраслей хозяйственной деятельности. Технология машиностроения представляет собой отрасль науки, которая занимается изучением закономерностей, действующих в процессе изготовления машин, с целью достижения требуемого качества машин с наименьшей себестоимостью.

Начало формирования технологии машиностроения как отрасли науки относится к периоду появления научных трудов, содержащих описание и обобщение опыта изготовления машин, вооружения, изделий литейного и кузнечного производства. Накопленный опыт впервые был обобщен профессором Московского университета И.А. Двигубским, который в 1807 г. выпустил книгу «Начальные основания технологии, или Краткое описание работ, на заводах и фабриках производимых». Дальнейшее обобщение опыта нашло отражение в трудах профессоров И.И. Тиме (1838 – 1920 гг.), Л.Н. Гавриленко (1861 – 1914 гг.) и др.

Современное представление технологии машиностроения как отрасли технической науки сформировалось на основе трудов многих отечественных и зарубежных ученых и работников промышленности.

Значительный вклад в развитие технологии машиностроения был сделан советскими учеными Б.С. Балакшиным, Н.А. Бородачевым, К.В. Вотиновым, В.И. Дементьевым, М.Е. Егоровым, А.А. Зыковым, А.И. Кашириным, В.М. Кованом, И.А. Когановым, А.М. Кузнецовым, В.С. Корсаковым, А.А. Маталиным, Э.А. Сателем, А.П. Соколовским,

Д.В. Чарнко, А.Б. Яхиным и др.

Развитие новых прогрессивных технологических процессов механообработки и сборки способствует конструированию более современных машин и снижению их себестоимости.

Знание технологических закономерностей, позволяющих выявить связи, действующие в процессе изготовления машин, является определяющим условием проектирования высокоэффективных технологических процессов изготовления деталей и сборки машин.

Увеличение номенклатуры выпускаемых изделий, уменьшение сроков их морального старения, обусловленное возрастающей потребностью создания новых более эффективных образцов машин, привело к необходимости создания нового технологического оборудования, управляемого от ЭВМ, которые обеспечивают автоматизированное изготовление деталей небольшими сериями.

Данный учебник написан коллективом авторов, представляющих технологические школы трех ведущих технических университетов – МГТУ «Станкин», Владимирского государственного университета и Московского горного университета.

В учебнике излагаются используемые при технологическом проектировании основы теории баз, теории размерных цепей, современные методы расчета припусков и операционных размеров, а также методы управления технологическими и производственными процессами, основанные на широком применении ЭВМ и систем адаптивного управления.

Учебник предназначен для студентов вузов, обучающихся по направлениям «Технология, оборудование и автоматизация машиностроительных производств», «Автоматизация и управление» и специальностям «Технология машиностроения», «Металлорежущие станки и инструменты», «Автоматизация технологических процессов и производств», а также другим техническим специальностям. Книга представляет также интерес для широкого круга инженерно-технических работников заводов, проектных организаций и институтов, занимаю-

щихся вопросами технологического проектирования, автоматизацией и управлением производственными процессами в машиностроении.

## **Глава 1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ**

### **1.1. Производственный, технологический и вспомогательные процессы в машиностроении**

Превращение природных ресурсов в полезное для человека изделие происходит в результате выполнения производственного процесса. Он включает все этапы, которые проходит исходное сырье по пути его превращения в готовое изделие.

Так для изготовления готовой продукции на машиностроительных заводах требуется выполнить комплекс работ, а именно завезти на завод необходимые материалы, произвести контроль их качества и количества, организовать транспортировку, учет и хранение на складах. Затем необходимо изготовить заготовки, обработать их и получить готовые детали. В процессе изготовления детали контролируют и транспортируют как внутри цеха, так и между цехами. Из полученных отдельных деталей собирают изделия, которые затем окрашивают, упаковывают и сдают на склад готовой продукции.

Таким образом, *производственным процессом* называется совокупность всех выполняемых этапов, включающих действия людей и работу применяемых на данном предприятии орудий труда, которые необходимы для изготовления и ремонта выпускаемой продукции.

Для осуществления производственного процесса современный машиностроительный завод имеет основное и вспомогательное производство.

К *основному производству* относится производство товарной продукции. К *вспомогательному* производству относится производство средств, необходимых для обеспечения функционирования основного производства. Состав цехов и служб предприятия с указанием связи между ними представляет *производственную структуру* машиностроительного производства.

Производственный процесс осуществляется на *производственной участке*, который представляет группу рабочих мест, организованных по предметному, технологическому или предметно-технологическому

принципам. Совокупность производственных участков образует *цех*.

Часть цеха, предназначенная для выполнения работы одним или группой рабочих, где размещены технологическое оборудование, инструмент, приспособления и стеллажи, называется *рабочим местом*. Таким образом, рабочее место является элементарной единицей структуры предприятия, где размещены исполнители работы, обслуживаемое технологическое оборудование и предметы труда.

Производственный процесс состоит из отдельных частей-этапов, при выполнении которых происходит качественное изменение объекта производства. Под качественным изменением объекта производства понимается изменение формы или размеров заготовки при механообработке, изменение физико-механических свойств материала при термообработке, изменение качества поверхности при отделке или покраске, а также изменение относительного положения деталей в процессе сборки изделия и др.

Часть производственного процесса, при выполнении которой происходит качественное изменение объекта производства, называется *технологическим процессом*.

Примерами технологических процессов являются: технологический процесс изготовления вала или зубчатого колеса; технологический процесс получения заготовки – штамповки или отливки; технологический процесс термообработки – закалки детали; технологический процесс сборки редуктора.

Таким образом, в результате выполнения различных технологических процессов происходит изменение геометрической формы и размеров заготовки, изменение качества поверхности и внешнего вида объекта производства, изменение физико-химических свойств материалов, изменение относительного положения деталей при их соединении в процессе сборки и др.

Производственный процесс на машиностроительных заводах включает ряд технологических процессов, например литье, ковку, штамповку, сварку, механическую обработку, термическую обработку, сборку и многое другое.

## **1.2. Структура технологического процесса**

Технологический процесс изготовления изделия или отдельной детали разделяется на части. Это обусловлено физическими и экономиче-

скими факторами. Так, например, физически невозможно осуществить обработку призматической заготовки со всех шести сторон с одной установки. В свою очередь, экономически нецелесообразно создавать многошпиндельный станок для одновременной обработки группы отверстий в корпусной детали, изготавливаемой в единичном производстве в количестве двух-трёх штук.

Изготовление деталей в общем случае связано с необходимостью обработки различных по геометрии поверхностей – плоских, цилиндрических, резьбовых и прочих, – что требует применения различных методов обработки и различного оборудования. При этом для достижения требуемой точности детали предварительную черновую обработку заготовки следует отделять от чистовой финишной обработки, что также означает деление технологического процесса на части.

Законченная часть технологического процесса, выполняемая на одном рабочем месте одним или несколькими рабочими, называется *операцией*.

Операция охватывает все действия, выполняемые рабочими и оборудованием над одним или несколькими совместно обрабатываемыми объектами производства.

Как следует из определения, характерным для операции является неизменность рабочего места, объекта обработки и исполнителей. Например, черновая токарная обработка, выполненная сначала на одном конце вала, а после переустановки – на другом, представляет одну операцию. Если черновую токарную обработку одного конца вала у всей партии заготовок выполняют на определенном рабочем месте, а потом на том же или другом рабочем месте обрабатывают второй конец вала, то имеют место две операции.

Если чистовая обработка заготовки следует за черновой и обе работы выполняет на одном и том же рабочем месте один рабочий, то все это в целом представляет одну операцию. Если же между черновой и чистовой обработками выполняют термическую обработку – закалку, то вся работа в целом представляет три операции.

Операция является основным элементом производственного планирования и учета. По количеству необходимых технологических операций определяют трудоемкость технологического процесса, требуемое число рабочих, необходимое количество оборудования и инструмента.

При выполнении производственного и технологических процессов

возникает необходимость выполнения сопутствующих работ, которые непосредственно не определяют качественное изменение объекта производства, например контроль деталей, их транспортирование, складирование и т. п. Подобные работы являются *вспомогательными операциями* производственного и технологических процессов.

Таким образом, различные технологические процессы механической обработки разделяют на операции, которые, в свою очередь, включают выполнение определенных *переходов, проходов, приемов, установок* заготовки и ее перемещения на заданные *позиции*.

*Технологический переход* – законченная часть технологической операции, характеризуемая постоянством применяемого инструмента и поверхностей, образуемых обработкой или соединяемых при сборке.

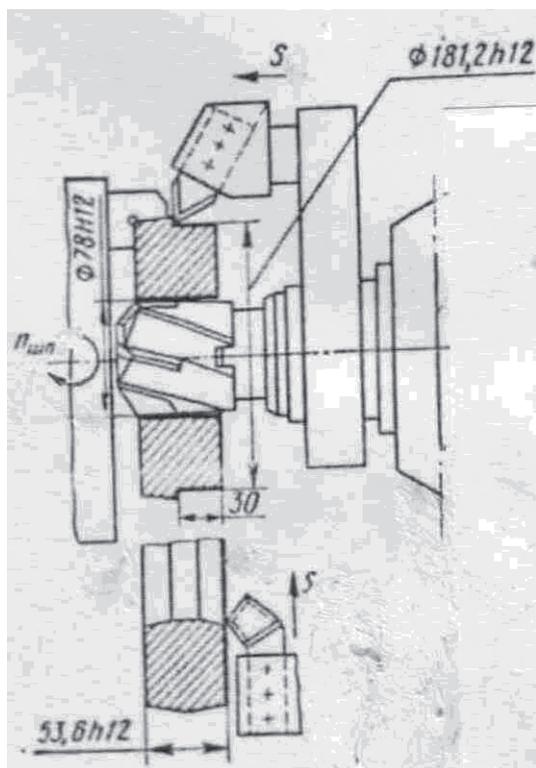


Рис. 1.1. Технологические переходы, выполняемые на токарно-револьверном станке при обработке диска: первый – точение по наружной поверхности, второй – подрезка торца, третий – зенкерование отверстия

При обработке резанием технологический переход представляет собой законченный процесс получения каждой новой поверхности или сочетания поверхностей одним режущим инструментом. Например, на токарно-револьверном станке производят обработку диска: точение, подрезку торца и сверление в торце отверстия (рис. 1.1). Указанная обработка выполняется на одном станке различными инструментами, следовательно, она представляет собой одну операцию, состоящую из трех переходов: первый – наружное точение в размер  $\Phi 181,2 h12$ , второй – подрезка торца в размер  $53,6 h12$ , третий – зенкерование отверстия в размер  $\Phi 78,2 H12$ .

Применительно к сборочным операциям технологический переход представляет собой законченный процесс присоединения одной детали к другой. Примерами являются – установка шпонки на вал, монтаж подшипника на вал, завертывание винта или гайки, запрессовка втул-

ки и др. На операциях термической обработки технологическими переходами являются – нагрев заготовки, закалка, очистка окалины. Таким образом, формирование переходов осуществляется по технологическим принципам, а формирование операций – по организационным.

Технологические переходы при механообработке могут выполняться за один или несколько проходов (рабочих ходов). *Проход (рабочий ход)* является частью технологического перехода, которая представляет собой однократное перемещение инструмента относительно заготовки, в результате которого с поверхности или сочетания поверхностей заготовки снимается один слой материала. Так, например, шлифование валика на круглошлифовальном станке выполняется за несколько проходов. Точение ступенчатого валика из круглого проката на токарном

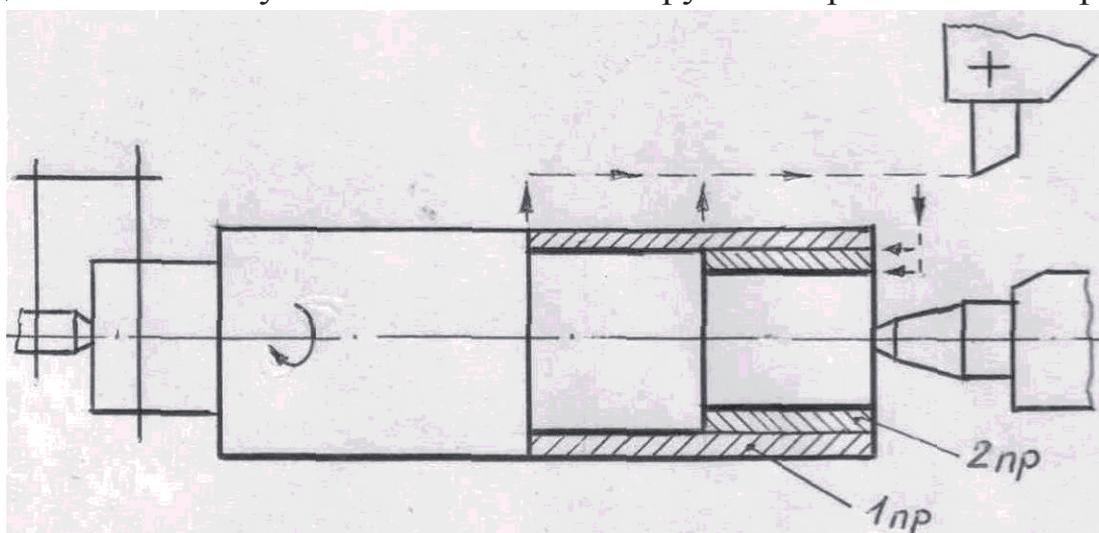


Рис. 1.2. Схема многопроходной обработки ступенчатого валика на токарном станке с ЧПУ: 1 пр – первый проход; 2 пр – второй проход

станке с числовым программным управлением (ЧПУ) также выполняется за несколько проходов (рис. 1.2).

В процессе выполнения операций помимо технологических переходов, определяющих непосредственное изменение качественного состояния объекта, выполняют также вспомогательные переходы – установку и закрепление заготовки, включение и выключение станка, подвод и отвод режущего инструмента и др.

*Вспомогательный переход* – часть технологической операции, которая включает законченное действие человека или оборудования, которое не сопровождается изменением формы, размеров или качества поверхностей, но необходимо для выполнения технологического перехода.

Таким образом, технологические операции состоят из технологи-

ческих и вспомогательных переходов, которые, в свою очередь, включают проходы – рабочие и вспомогательные ходы.

Переходы могут быть совмещены во времени за счет одновременной обработки нескольких поверхностей детали несколькими режущими инструментами. Их можно выполнять последовательно, параллельно (например, одновременная обработка нескольких поверхностей на агрегатных или многолезцовых станках) и параллельно-последовательно.

Для обработки заготовку устанавливают и закрепляют с требуемой точностью в приспособлении или на станке. В процессе сборки деталь аналогично устанавливают на сборочном стенде или относительно другой базовой детали.

Процесс придания заготовке (детали) требуемой точности относительного положения при закреплении ее в приспособлении, на станке или в собираемом изделии называется *установом*. При механообработке установ представляет собой часть технологической операции – один из первых выполняемых вспомогательных переходов.

Операция может выполняться за один или несколько установов. Например, вал, закрепленный в трехкулачковом патроне, обтачивают с одного конца, а затем вынимают заготовку из патрона, поворачивают ее на  $180^\circ$ , повторно закрепляют и обтачивают с другого конца. Эта операция выполняется за два установка.

*Позицией* называют фиксированное положение, занимаемое неизменно закрепленной заготовкой или собираемой сборочной единицей совместно с приспособлением относительно инструмента или неподвижной части оборудования для выполнения определенной части операции (одного или нескольких переходов). Так, например, при обработке отверстия зубчатого колеса на вертикальном сверлильно-расточном полуавтомате с поворотным столом заготовка проходит четыре позиции (рис. 1.3). На позиции I происходит установка и съем заготовки, на позиции II выполняется сверление отверстия, на позиции III – зенкерование, а на позиции IV выполняют развертывание отверстия.

Аналогично, при обработке заготовки на шестишпиндельном токарном автомате закрепленная заготовка в процессе цикла обработки проходит шесть позиций. Каждый поворот шпиндельного барабана соответствует определенной позиции.

Технологический процесс сборки также разделяется на операции, если собираемое изделие переходит с одного рабочего места на дру-

гое. При этом имеют место различные переходы, а также разделение на установки и позиции.

Количество времени, затрачиваемое работающими на выполнение технологического процесса или его части при нормальной интенсивности работы в нормальных производственных условиях, называется *трудоемкостью*.

Единицей измерения трудоемкости является человеко-час. Различают трудоемкость расчетную (нормируемую) и фактическую.

Для расчета необходимого количества оборудования применяют понятие станкоемкость. *Станкоемкостью* называется время занятости работы станка или нескольких станков для выполнения определенной технологической операции, единица измерения – станко/час. Станкоемкость также бывает расчетной и фактической. Различают станкоемкость технологической операции, станкоемкость изготовления детали, станкоемкость изделия.

Для нормирования труда и планирования производства используют понятие *норма времени*, которое означает установленное количество труда надлежащей квалификации и нормальной интенсивности, необходимое для выполнения какой-либо операции или целого технологического процесса в нормальных производственных условиях. Нормы времени измеряют в единицах времени – часах, минутах – с указанием разряда выполняемой работы. Например, 1,5 ч 4-го разряда.

На малотрудоемкие операции, измеряемые в долях минуты, устанавливают норму выработки. *Нормой выработки* называют количество заготовок, которое необходимо обработать в единицу времени, например 100

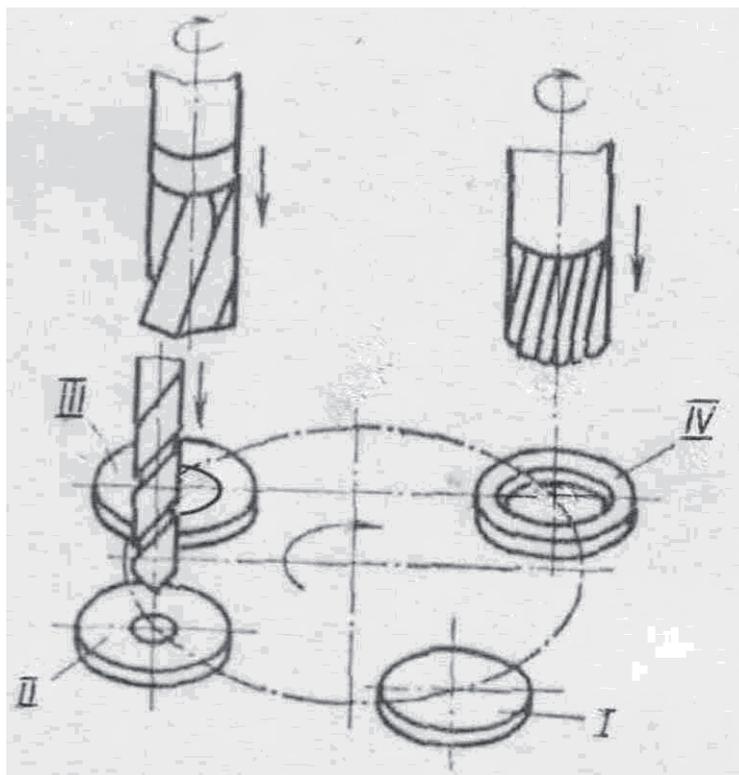


Рис. 1.3. Схема обработки отверстия зубчатого колеса на 4-позиционном вертикальном сверлильно-расточном полуавтомате с поворотным столом

штук в час [шт./ч] или 5 штук в минуту [шт./мин]. При этом также указывают разряд выполняемой работы – 100 [шт./ч], работа 3-го разряда.

Промежуток календарного времени, измеренный от начала какой-либо периодически повторяющейся операции технологического или производственного процесса до его окончания, называется *циклом*.

Различают цикл операции, цикл изготовления детали, цикл изготовления машины. Последнее представляет собой отрезок календарного времени от начала изготовления первой детали до выпуска готовой машины.

Если процесс протекает один раз, то говорят не о цикле, а о продолжительности процесса.

*Тактом выпуска* называют промежуток времени, через который происходит периодический выпуск – машины, сборочной единицы, детали или заготовки. Выражение – «такт выпуска изделия равен 3 мин» означает, что через каждые 3 мин завод выпускает готовое изделие.

Величина обратная такту выпуска называется *ритмом выпуска*. Ритм характеризует скорость выпуска изделий, измеряемую в единицах [шт./мин], [шт./ч].

### **1.3. Типы производств и их особенности**

Выпуск изделий машиностроения осуществляется в соответствии с потребностью народного хозяйства, по запросам рынка.

*Объем выпуска* характеризует количество изделий, подлежащих изготовлению в планируемый период времени – год, квартал, месяц.

*Программа выпуска* определяет состав выпускаемых изделий заданного объема по каждому наименованию в определенную единицу времени – год, квартал, месяц.

*Величиной серии* называют общее количество изделий, подлежащих изготовлению по неизменным чертежам. При переходе на выпуск новой конструкции данного типа изделий или при модернизации изделия происходит изменение чертежей и замена в обозначении изделия. Так, например, при изготовлении револьверных станков выпускались модели 136, 1Д36, 1М36, а при изготовлении токарных станков – модели 1А62, 1К62.

*Партией* называется определенное количество заготовок, одновременно поступающее для выполнения обработки на одно рабочее место.

В зависимости от количества выпускаемых изделий, их номенклатуры, регулярности и объема выпуска меняются организация производства

и характер технологического процесса. В машиностроении существуют три основных типа производства – *единичное, серийное и массовое*.

*Единичным* называется производство, характеризуемое малым объемом выпуска однотипных изделий, повторное изготовление и ремонт которых, как правило, не предусматривается. Продукция единичного производства обычно не имеет широкого применения, это опытные образцы изделий, единичные машины и агрегаты, уникальные станки и пр.

*Серийным* называется производство, характеризуемое периодическим изготовлением или ремонтом изделий повторяющимися партиями.

В зависимости от количества изготавливаемых изделий в партии различают *мелкосерийное, среднесерийное и крупносерийное* производство. Примерами продукции серийного производства являются периодически выпускаемые определенными партиями металлорежущие станки, компрессоры, тепловозы и др.

Продукция серийного производства значительно дешевле, чем при единичном производстве, а цикл ее изготовления короче.

*Массовым* называется производство, характеризуемое большим объемом непрерывного выпуска одинаковых изделий по неизменным чертежам в течение продолжительного времени, когда на большинстве рабочих мест выполняется определенная рабочая операция. Характерным признаком массового производства является малая номенклатура и большой объем выпуска изделий. Изделия массового производства находят наибольший спрос.

Примерами такой продукции являются подшипники, электродвигатели, холодильники, автомобили и пр.

При оценке типа производства необходимо учитывать не только объем выпуска, но также вид изделия, его габариты, вес и трудоемкость изготовления. Так, например, изготовление 500 гаек относят к единичному производству, а изготовление 500 станков следует отнести к крупносерийному производству. Для определения типа производства используют коэффициент закрепления операции  $K_{з.о.}$ , методика расчета которого приведена в параграфе 8.1.

По форме организации и характеру протекания производственный процесс делят на два вида – *поточный и непоточный*.

*Поточным* называется производство, при котором заготовки, детали или сборочные единицы, пройдя определенную операцию, непосредственно передаются на последующую операцию, продолжитель-

ность которой равна или кратна такту выпуска. При этом оборудование расставляется по ходу технологического процесса. В результате заготовки, изготавливаемые детали и собираемые сборочные единицы находятся в движении постоянного «потока», скорость которого определяется тактом выпуска готового изделия. Характерной особенностью поточного производства является соблюдение постоянства такта выпуска изготавливаемого изделия.

*Непоточным* называется производство, при котором заготовки, детали или сборочные единицы проходят не синхронизированные во времени операции с различной продолжительностью пролеживания между ними, без соблюдения постоянства или кратности такта выпуска. При непоточном производстве отсутствует ритмичность, такт выпуска не соблюдается (он, по существу, отсутствует), а организация производства основывается на графике, определяющем количественный выпуск изделий к заданному моменту времени – концу месяца, квартала, года.

Имеет место также переменнo-поточная форма организации производства. Ее применяют при серийном производстве для периодического выпуска изделий, близких по служебному назначению (например, электродвигатели разных типоразмеров). Другим примером может служить поточная линия, на которой в течение определенного промежутка времени обрабатывают заготовки одного типоразмера. Затем осуществляют переналадку линии и обрабатывают заготовки другого типоразмера.

Поточную форму применяют для организации крупносерийного и массового производств. При поточном производстве сокращаются цикл изготовления продукции и межоперационные заделы, а также снижаются трудоемкость и себестоимость изделия в целом. Непоточную форму применяют для организации единичного и мелкосерийного производств.

В качестве классификационной категории производства, выделяемой по технологическому признаку применяемых методов изготовления изделий, применяют также понятие *вид производства*, например литейное производство, механосборочное, сварочное и др.

### **Вопросы для самопроверки**

1. Что такое производственный и технологический процессы?
2. Приведите примеры технологических процессов изготовления деталей.
3. Что такое технологическая операция, переход, проход?

4. Приведите примеры технологических операций механической обработки и сборки.
5. Что такое вспомогательные операции производственного и технологических процессов? Приведите их примеры.
6. Что такое проход (рабочий ход)?
7. Что называется рабочим местом, производственным участком, цехом?
8. Что такое установ, позиция?
9. Что называется трудоемкостью, станкоемкостью, нормой времени, нормой выработки, тактом выпуска?
10. Что называется объемом выпуска, программой выпуска, величиной серии?
11. Какие три основных типа производства вы знаете?
12. В чем заключается отличие поточного производства от непоточ-

ного?

## **Глава 2. МАШИНА КАК ОБЪЕКТ ПРОИЗВОДСТВА. СЛУЖЕБНОЕ НАЗНАЧЕНИЕ И КАЧЕСТВО МАШИН**

### **2.1. Исполнительные поверхности машины и связи между ними**

Любая машина (изделие) создается для выполнения определенных задач, которые определяются ее служебным назначением.

*Служебное назначение* – это максимально уточненная и четко сформулированная задача, для решения которой создается данная машина.

В формулировке служебного назначения должны присутствовать основные параметры изготавливаемого изделия с обоснованными цифровыми значениями, которые количественно определяют задачу изготовления машины.

В качестве примера можно привести формулировку служебного назначения шестеренного насоса трактора: шестеренный насос предназначен для подачи масла к трущимся поверхностям деталей трактора под давлением 0,6 МПа в объеме не менее 30 л/мин при частоте вращения входного вала 350 об/мин.

Правильно и четко сформулированное служебное назначение на начальном этапе проектирования машины имеет решающее значение для решения технологических задач в процессе ее изготовления.

Помимо служебного назначения на каждое создаваемое изделие устанавливаются определенные технические требования, которые должны непосредственно вытекать из служебного назначения. Поэтому при создании машины, в первую очередь, после ознакомления с ее служебным назначением следует выполнить анализ предъявляемых к ней технических требований.

Анализ технических требований должен быть критическим на предмет их соответствия и достаточности служебному назначению.

Сдача изготовленного изделия потребителю осуществляется путем контроля и сравнения фактических значений параметров с соответствующими параметрами, заданными в технических требованиях на изготовление машины.

Излишне жесткие технические требования приводят к резкому удорожанию машины. С другой стороны, могут возникнуть неприятности,

когда при анализе пропущены важные технические требования. Каждое техническое требование должно быть ограничено допускаемыми предельными отклонениями – верхним и нижним, которые определяют соответствующий допуск.

Любая машина выполняет свое служебное назначение с помощью исполнительных поверхностей или их сочетаний. Между исполнительными поверхностями в машине имеют место конструктивные кинематические и размерные связи, которые проявляются в процессе эксплуатации.

Так, например, исполнительными поверхностями универсального токарного станка (рис. 2.1) являются:

1. Сочетание поверхностей переднего конца шпинделя и пиноли задней бабки, обеспечивающих базирование на станке обрабатываемой заготовки;
2. Сочетание поверхностей поворотной резцедержавки, обеспечи-

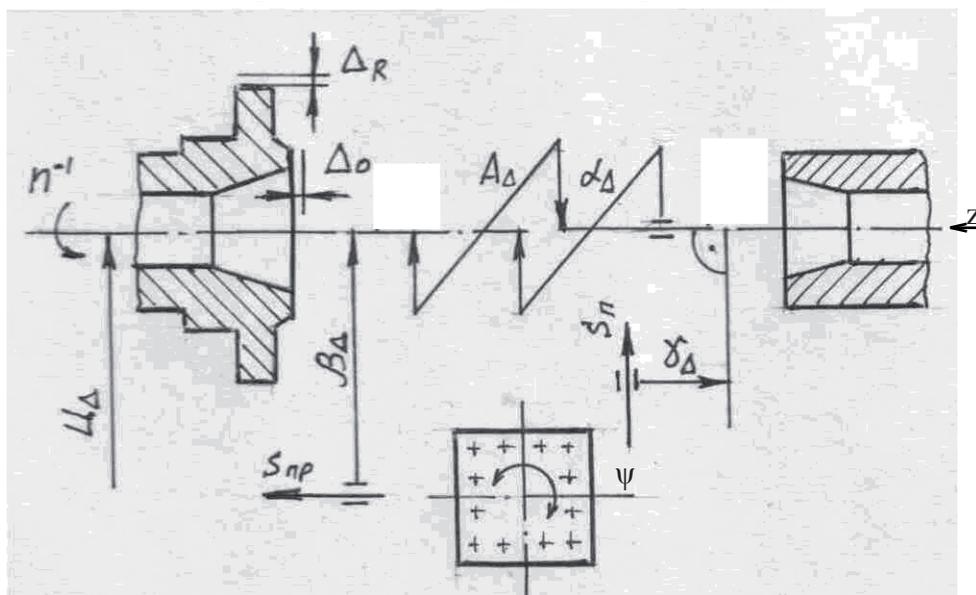


Рис. 2.1. Кинематические и размерные связи, формируемые между исполнительными поверхностями токарного станка

вающей базирование режущего инструмента.

Кинематические связи определяют точность относительного перемещения исполнительных поверхностей. В данном примере это частота вращения шпинделя  $n^{-1}$ , продольная подача суппорта  $s_{np}$  при точении, поперечная подача  $s_n$  при подрезке торцов, подача на оборот шпинделя  $s_o$ , применяемая для нарезания резьбы. Кроме того, на станке имеют место также вспомогательные перемещения исполнительных поверхностей, выполняемые вручную, без автоматического привода. Это

установочное осевое перемещение задней бабки  $z_6$  и пиноли  $z_{\Pi}$  в соответствии с длиной обрабатываемой заготовки, а также поперечное смещение задней бабки для точения конических поверхностей и поворот резцедержавки на угол  $\phi$  при работе с другим резцом.

Размерные связи определяют точность относительного положения исполнительных поверхностей (линейные и угловые размеры между ними):

$A_{\Delta}$  – соосность оси пиноли и оси шпинделя, при этом ось пиноли должна по вертикали располагаться выше оси шпинделя в пределах допуска  $T_{A_{\Delta}} = 0,02$ ;

$\alpha_{\Delta}$  – параллельность оси пиноли относительно оси шпинделя;

$\beta_{\Delta}$  – параллельность направления продольного перемещения суппорта относительно линии центров;

$\gamma_{\Delta}$  – перпендикулярность направления поперечного перемещения суппорта относительно линии центров при поперечном точении;

$\Delta_O, \Delta_R$  – допустимое осевое и радиальное биение шпинделя.

Определяющими размерами являются также расстояние от линии центров до направляющих станины  $\Pi_{\Delta}$  и расстояние до плоскости установки резцов  $P_{\Delta}$ .

Требования к точности размерных и кинематических связей между исполнительными поверхностями вытекают из служебного назначения изделия. В данном примере для токарного станка эти требования вытекают исходя из требований к точности обработки детали на станке.

Для перехода от параметров служебного назначения к параметрам связи исполнительных поверхностей используют соответствующие исходные уравнения, которые в общем виде можно записать:

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_i),$$

где  $y$  – конкретный параметр служебного назначения;

$x_1, x_2, \dots, x_i$  – аргументы, влияющие на этот параметр, которые определяют связи между исполнительными поверхностями.

Применительно к токарному станку такие уравнения в общем виде можно записать:

– для требования точности получения диаметральных размеров  $\omega_D$

$$\omega_D = f(A_{\Delta}, \alpha_{\Delta}, \beta_{\Delta}, \Delta_R \dots),$$

где  $A_{\Delta}, \alpha_{\Delta}, \beta_{\Delta}, \Delta_R$  – параметры, непосредственно влияющие на точность диаметральных размеров, получаемых при продольном точении;

– для требования точности получения линейных размеров при по-

перечном точении  $\omega_L$

$$\omega_L = f(\gamma_{\Delta}, \Delta_R),$$

где  $\gamma_{\Delta}, \Delta_R$  – параметры, влияющие на точность линейных размеров при поперечном точении  $\omega_L$ .

Аналогично точность шага резьбы  $\omega_p$ , получаемой при нарезании ее резцом, зависит от параметров

$$\omega_p = f(s_0, \beta_{\Delta}, \Delta_0, \Delta_R).$$

## 2.2. Виды поверхностей деталей машин

Различные поверхности деталей машин в общем случае могут быть классифицированы по функциональному назначению на четыре вида:

1. Исполнительные поверхности – это поверхности, которыми деталь выполняет свое служебное назначение (поверхности детали, с помощью которых реализуется ее служебное назначение).

2. Основные базирующие поверхности (основные конструкторские базы детали) – поверхности, при помощи которых определяется положение детали в машине.

3. Вспомогательные базы – поверхности детали, при помощи которых определяется положение других деталей, присоединяемых к данной.

4. Свободные поверхности – поверхности, которые не соприкасаются, не контактируют с поверхностями других деталей.

Во многих случаях вспомогательные базы деталей выполняют роль исполнительных поверхностей.

В качестве примера на рис. 2.2 представлен вал редуктора с установленным на нем зубчатым колесом. Исполнительными поверхностями зубчатого колеса являются боковые поверхности зубьев, обеспечивающие передачу крутящего момента от одного колеса к другому.

Основными конструкторскими базами зубчатого колеса являются базовое отверстие, левый торец и шпоночный паз в отверстии, по которым зубчатое колесо устанавливается на вал. На рис. 2.2 основные базы деталей обозначены точка-

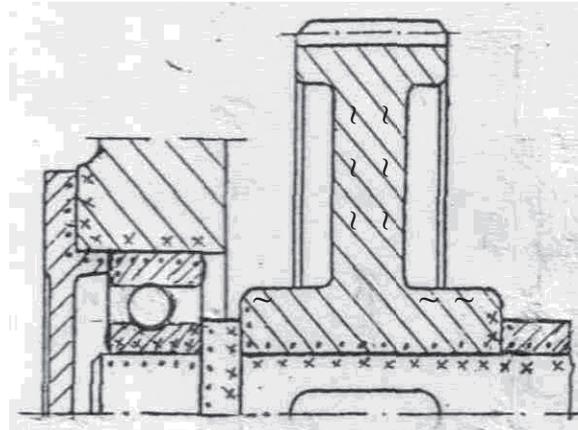


Рис. 2.2. Схема расположения 4 видов поверхностей на деталях редуктора: (...) – основные базы детали; (xxx) – вспомогательные базы; (~~~~) – свободные поверхности

ми. В свою очередь, основными базами вала являются опорные шейки под подшипники, торец буртика и шпоночный паз на конце вала, через который передается крутящий момент на вал. Подшипники, определяющие положение вала, установлены в отверстие корпуса. Основными базами подшипника являются цилиндрическая поверхность наружного кольца и его торец, который упирается в крышку. Две крышки закрывают отверстие в корпусе. Основными базами крышки являются фланец и центрирующий пояс, по которым крышка базируется в корпусе.

Положение зубчатого колеса на валу определяют вспомогательные базы вала – это центральная ступень вала и торец его буртика. На рис. 2.2 вспомогательные базы деталей обозначены крестиками. Отверстия, в которых установлены подшипники, являются вспомогательными базами корпуса. Роль вспомогательных баз выполняют также две торцевые поверхности корпуса, которые определяют положение крышек. В свою очередь, вспомогательной базой крышки является ее торец, который определяет осевое положение наружного кольца подшипника. Свободные поверхности деталей на схеме обозначены значком в виде змейки.

Анализ приведенной на рис. 2.2 схемы показывает, что соединение деталей в машинах происходит путем совмещения основных базирующих поверхностей присоединяемой детали, например зубчатого колеса, со вспомогательными базирующими поверхностями базовой детали – вала.

Если с основными базами присоединяемой детали – шестерни (рис. 2.3) связать координатную систему  $(X, Y, Z)$ , а со вспомогательными базами базовой детали вала – координатную систему  $(x, y, z)$ , то сборку деталей можно представить как совмещение координатной системы основных баз шестерни  $(X, Y, Z)$  с координатной системой вспомогательных баз вала  $(x, y, z)$ :

$$(X, Y, Z) \Rightarrow (x, y, z)$$

↓

$\omega_y$

Отклонение одной координатной системы относительно другой характеризует погрешность установки зубчатого колеса на вал  $\omega_y$ , которая определяется вектором

$$\omega_y = (a_y, b_y, c_y, \alpha_y, \beta_y, \gamma_y),$$

где  $a_y, b_y, c_y$  – параметры смещения,  $\alpha_y, \beta_y, \gamma_y$  – параметры поворота одной координатной системы относительно другой.

Так как положение детали в изделии определяют ее основные базы,

а работает деталь в изделии исполнительными поверхностями или вспомогательными базами, то наиболее важными размерами детали,

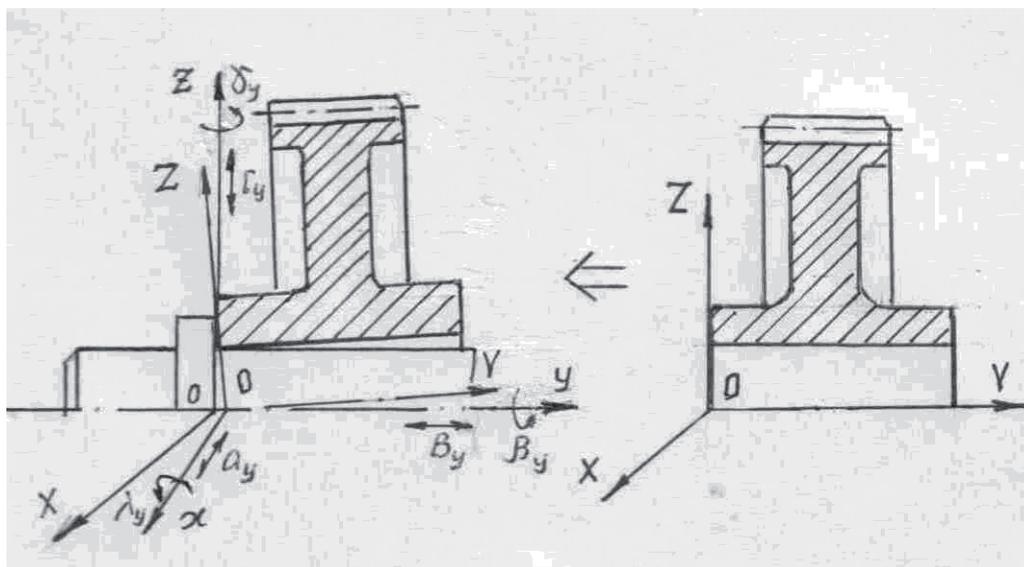


Рис. 2.3. Совмещение координатных систем присоединяемой и базовой деталей в процессе сборки

проставка которых на чертеже обязательна, являются линейные и угловые размеры, определяющие положение вспомогательных баз детали относительно ее основных баз.

Процесс разработки конструктивных форм машины (изделия) и детали обычно выполняют в следующей последовательности:

- 1) четко формулируют служебное назначение изделия с указанием количественных значений параметров;
- 2) выбирают геометрию исполнительных поверхностей машины;
- 3) выбирают законы относительного движения исполнительных поверхностей, то есть устанавливают кинематические связи между исполнительными поверхностями;
- 4) разрабатывают кинематическую схему машины, в которой реализуются данные связи;
- 5) зная силы, действующие на исполнительных поверхностях машины, рассчитывают нагрузку на каждом из звеньев кинематической цепи;
- 6) зная силы, действующие на каждое из звеньев (деталей), выбирают материал для каждой детали с учетом ее служебного назначения и фактической нагрузки;
- 7) путем расчета определяют размеры и конструктивную форму каждой детали машины.

В общем случае между исполнительными поверхностями машин

действуют различные виды связей – механические, электрические, гидравлические и др. Однако все они закладываются в машину при ее конструировании в виде кинематических и размерных связей, то есть в виде расстояний и поворотов, формируемых между ее исполнительными поверхностями.

### 2.3. Показатели качества машин и их деталей

Чтобы машина удовлетворяла служебному назначению, она должна обладать необходимым качеством.

Под качеством машины понимается совокупность ее свойств, которые определяют соответствие машины ее служебному назначению и отличают одну машину от другой. Основными показателями качества машины являются:

- 1) качество выпускаемой продукции;
- 2) стабильность выполнения машиной ее служебного назначения;
- 3) физическая и моральная долговечность;
- 4) производительность;
- 5) безопасность в работе, простота и удобство в обслуживании;
- 6) коэффициент полезного действия – КПД машины;
- 7) степень механизации и автоматизации и др.

Основные технические характеристики и качественные показатели машин, изготавливаемых серийно, определяются соответствующими ГОСТами, на основе которых оценивают уровень качества машины.

Показателями качества машины, достижение которых вызывает наибольшие трудности и затраты, являются показатели точности машины и ее деталей. Под точностью детали и машины понимают степень ее приближения к геометрически правильному прототипу, то есть *степень приближения действительных значений параметров к заданным на чертеже*. За меру точности принимается величина отклонения от заданного номинала.

Изготовить деталь абсолютно точно в соответствии с номинальными значениями геометрических параметров, заданных конструктором в чертежах, практически невозможно. Это объясняется действием в процессе изготовления деталей на станках ряда возмущающих факторов, которые приводят к образованию отклонений.

Поэтому на параметры геометрической точности устанавливают допусковые предельные отклонения ( $\Delta^в$  – верхнее и  $\Delta^н$  – нижнее), в пределах которых деталь может выполнять свое служебное назначе-

ние. Превышение заданных предельных отклонений означает появление бракованной детали.

Разность между верхним и нижним предельными отклонениями определяет допуск  $T$  на соответствующий параметр точности детали, например допуск на размер  $A$ :

$$T_A = \Delta^B - \Delta^H,$$

который является мерой точности рассматриваемого параметра. Чем меньше допуск, тем выше точность соответствующего параметра. И, наоборот, широкий допуск означает меньшую точность. На каждый ответственный параметр устанавливают поле допуска  $T$ , в пределах которого должно быть расположено действительное значение того или иного параметра. Схема расположения поля допуска относительно номинала, из которой следуют возможные формы задания параметров точности при их нормировании и расчете, представлена на рис. 2.4:

1. Задание номинального значения  $A$  и предельных отклонений ( $\Delta^B, \Delta^H$ ). Предельные значения параметра ( $A_{\max}, A_{\min}$ ) и допуск  $T_A$  рассчитывают алгебраически:  $A_{\max} = A + \Delta^B, A_{\min} = A + \Delta^H, T_A = \Delta^B - \Delta^H$ .

2. Задание номинального значения  $A$ , допуска  $T_A$  и координаты середины поля допуска  $\Delta_0$ , которая определяет расстояние от номинала до середины поля допуска ( $A, T_A, \Delta_0$ ). Предельные значения параметра рассчитывают:

$$A_{\max} = A + \Delta_0 + \frac{T_A}{2};$$

$$A_{\min} = A + \Delta_0 - \frac{T_A}{2}.$$

3. Задание номинального значения  $A$  и предельных значений ( $A, A_{\max}, A_{\min}$ ).

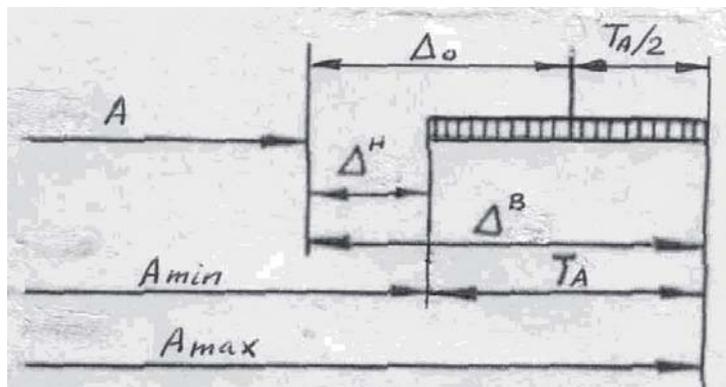


Рис. 2.4. Схема расположения поля допуска относительно номинала

Допуск и предельные отклонения при этом определяют по формулам:

$$T_A = A_{\max} - A_{\min}, \quad \Delta^B = A_{\max} - A, \quad \Delta^H = A_{\min} - A.$$

Координата середины поля допуска  $\Delta_0$  может быть определена по формулам

$$\Delta_0 = 0,5(\Delta^B + \Delta^H) \text{ или } \Delta_0 = 0,5(A_{\max} + A_{\min} - 2A).$$

Точность параметров детали устанавливает конструктор исходя из ее служебного назначения при проектировании машины. Конструктор устанавливает как номинальное значение параметра, так и его допускаемые предельные значения (предельные отклонения).

В процессе изготовления машины (детали) инженер-технолог обеспечивает заданную точность параметра  $A$  в пределах допускаемых предельных значений:

$$A_{\min} \leq A \leq A_{\max}.$$

При изготовлении деталей на станках в результате совокупного действия различных возмущающих факторов имеет место рассеяние достигаемых параметров точности, которое характеризуется полем рассеяния  $\omega_A$ :

$$\omega_A = A_{\partial\max} - A_{\partial\min},$$

где  $A_{\partial\max}$ ,  $A_{\partial\min}$  — соответственно наибольшее и наименьшее действительные значения достигаемого параметра в партии изготавливаемых деталей.

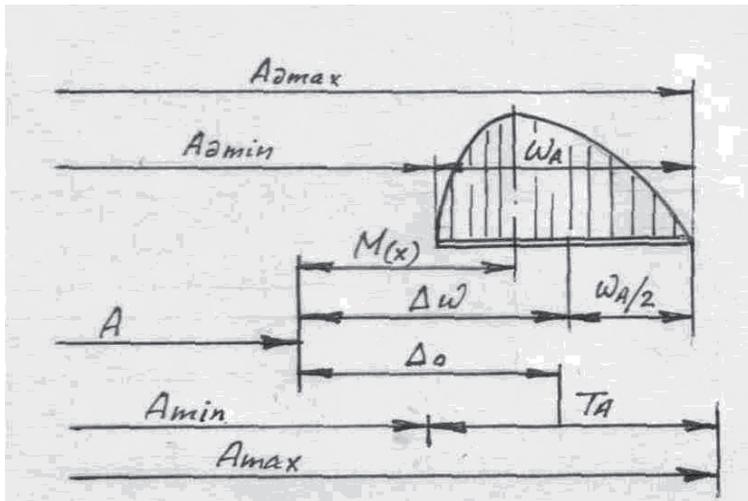


Рис. 2.5. Расположение поля рассеяния относительно поля допуска

Задача достижения требуемой точности заключается в том, чтобы поле рассеяния  $\omega_A$  не превышало поле допуска и правильно располагалось относительно номинала  $A$  (рис. 2.5):

$$\omega_A \leq T_A, \quad A_{\partial\min} \geq A_{\partial\max}, \\ A_{\partial\max} \leq A_{\max}.$$

Положение поля рассеяния  $\omega_A$  относительно номинала  $A$  определяет

координата середины поля рассеяния  $\Delta_{0\omega}$ , а наиболее вероятное значение отклонения определяет координата центра группирования  $M(x)$ .

## ***Параметры геометрической точности деталей машин***

Геометрию различных по служебному назначению деталей машин определяют размеры поверхностей детали, расстояния между ними, а также относительные повороты поверхностей и их геометрическая форма. В соответствии с этим рассмотрим каждый из параметров геометрической точности деталей в отдельности.

1. *Первым* параметром геометрической точности детали является *точность размеров* ее поверхностей и *расстояний* между ними. Размер определяет расстояние между двумя участками одной или двух поверхностей и обозначается двухсторонней стрелкой (рис. 2.6). Так, например, размером цилиндрической поверхности является ее диаметр, определяющий расстояние между двумя точками одной поверхности (рис. 2.6, *а*). В свою очередь, расстояние между двумя параллельными поверхностями определяет размер между двумя противоположными точками, расположенными на двух различных поверхностях (рис. 2.6, *б*). При этом в качестве измерительной базы для оценки точности размера в большинстве случаев может быть выбрана любая из двух рассматриваемых поверхностей.

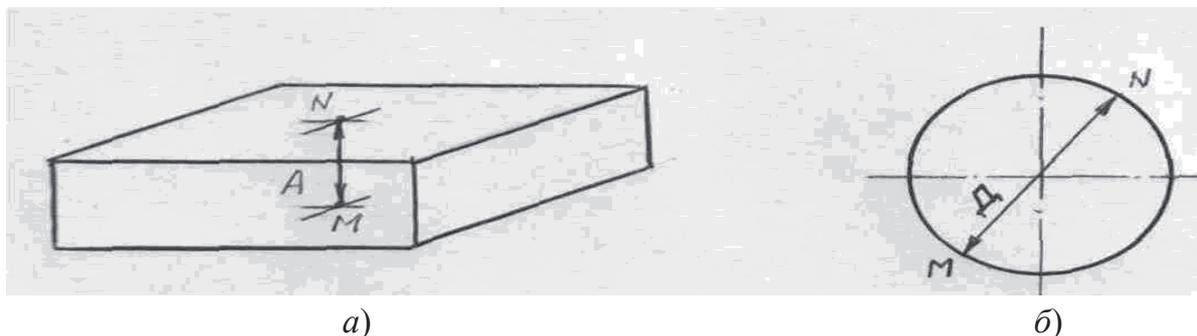


Рис. 2.6. Простановка размеров: *а* – между двумя точками одной поверхности; *б* – между двумя точками двух различных поверхностей

Согласно ГОСТ 25346-89 точность размеров регламентируется двадцатью квалитетами (01, 0, 1, 2, ..., 18). Допуск на линейный размер обозначается буквами IT (International tolerance), за которым следует номер квалитета, например IT7, IT8, IT10, IT12. С увеличением квалитета точность размера уменьшается.

2. *Вторым* параметром геометрической точности детали является *точность относительного поворота* поверхностей. Точность поворота определяет величину углового отклонения одной поверхности относительно другой, принятой за базу (за начало отсчета). При этом поворот одной поверхности относительно другой в пространстве следует рассма-

тривать в двух координатных плоскостях. Обозначение выполняют в соответствии с требованиями ЕСКД (рис. 2.7, а) или односторонней стрелкой, острие которой направлено на базу (рис. 2.7, б). Обозначение односторонней стрелкой определяет относительный поворот поверхности детали как звено (как угловой размер). В данном примере угловой размер  $\beta$  определяет параллельность поверхности А относительно поверхности Б, принятой за базу. Поэтому такое обозначение является наглядным и удобным при выявлении и расчете угловых размерных цепей.

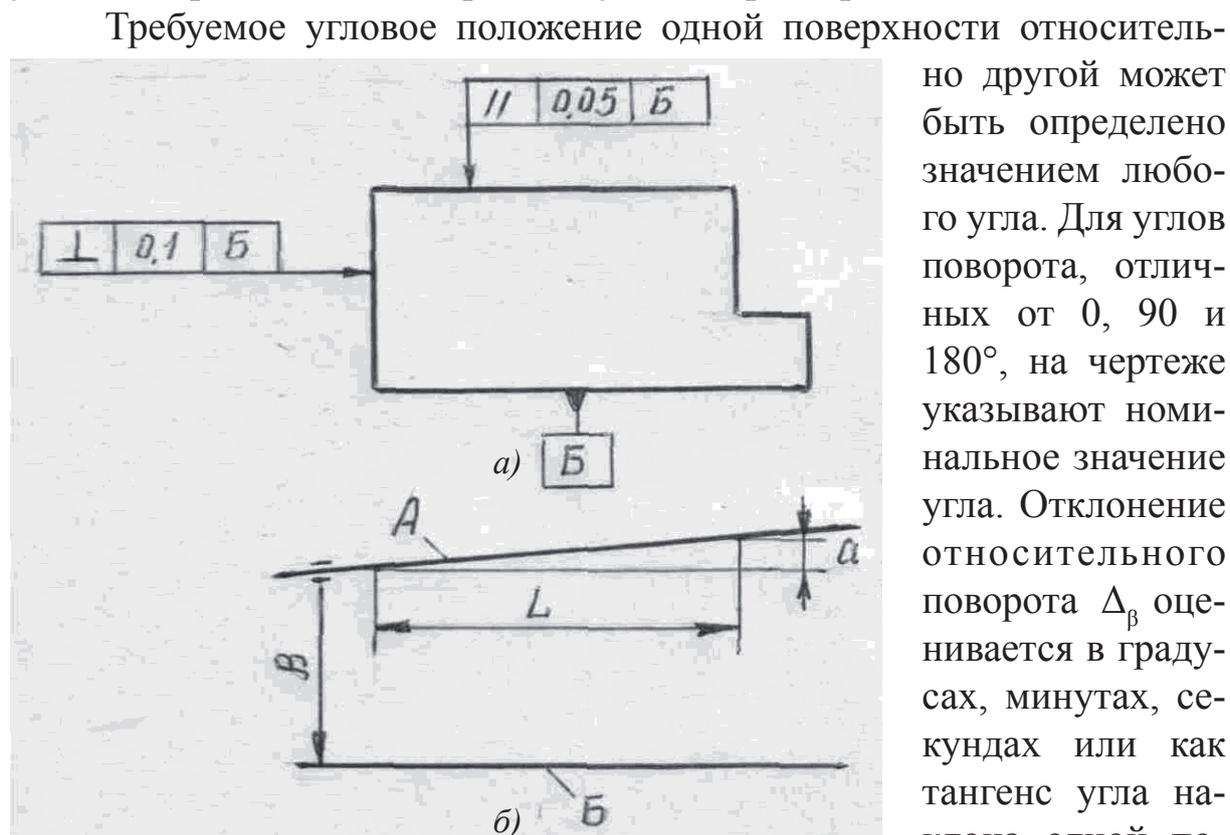


Рис. 2.7. Обозначение относительных поворотов поверхностей: а – на чертежах в соответствии с требованиями ЕСКД; б – в угловых размерных цепях и на технологических наладках

чае отклонение выражается в виде дроби

$$\Delta_{\beta} = \frac{a}{L}$$

у которой числитель определяет величину смещения  $a$  точки поверхности А, а знаменатель – расстояние  $L$ , на котором формируется данное смещение (см. рис. 2.7, б). Таким образом, численные значения угловых отклонений, например, имеют вид

$$\Delta_{\beta} = \frac{0,03}{200} \text{ или } \Delta_{\beta} = \frac{0,015}{100}.$$

но другой может быть определено значением любого угла. Для углов поворота, отличных от 0, 90 и 180°, на чертеже указывают номинальное значение угла. Отклонение относительного поворота  $\Delta_{\beta}$  оценивается в градусах, минутах, секундах или как тангенс угла наклона одной поверхности относительно другой. В последнем слу-

Согласно ЕСКД угловые отклонения – отклонения от параллельности, перпендикулярности, отклонения наклона нормируются как отклонения расположения поверхностей. При этом указываемые численные значения допусков определяют предельную величину смещения  $a$ , которая допустима в пределах габаритных размеров рассматриваемой поверхности.

3. Точность геометрической формы поверхностей деталей машин характеризуют – макрогеометрические отклонения, волнистость и шероховатость поверхности (микрогеометрические отклонения).

3.1. Макрогеометрические отклонения – это отклонения от правильной геометрической формы поверхности детали в пределах габаритных размеров поверхности (рис. 2.8).

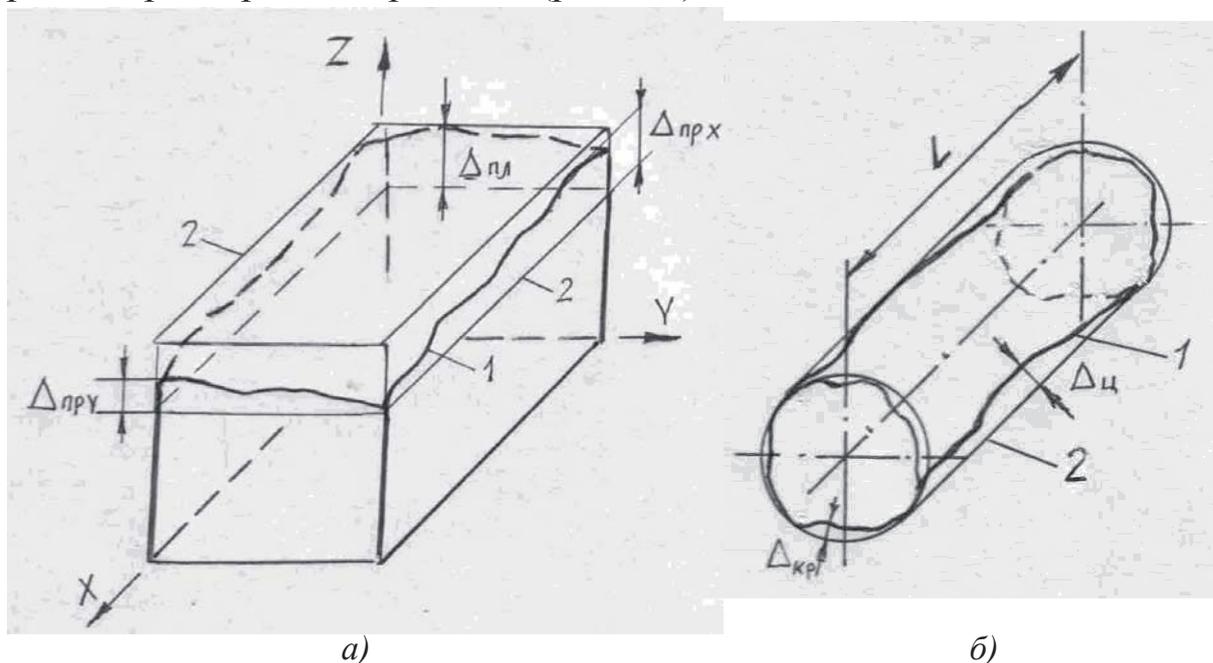


Рис. 2.8. Макрогеометрические отклонения реальной поверхности 1 от прилегающей поверхности 2: *а* – для плоской поверхности ( $\Delta_{пр\ x}$  – отклонения от прямолинейности в направлении оси  $X$  и  $\Delta_{пр\ y}$  – в направлении оси  $Y$ ;  $\Delta_{пл}$  – отклонение от плоскостности); *б* – для цилиндрической поверхности ( $\Delta_{ц}$  – отклонение от цилиндричности;  $\Delta_{кр}$  – отклонение от круглости)

Макрогеометрические отклонения и отклонения относительного поворота (отклонения расположения) поверхностей проявляются совместно и количественно оцениваются как суммарные отклонения точек реальной поверхности на базовой длине. В соответствии с этим допускается возможность нормирования суммарных отклонений геометрической формы и расположения поверхностей. Так, например, допускается установление суммарного допуска, ограничивающего от-

клонение от плоскостности и отклонение от параллельности одной поверхности относительно другой, принятой за базу.

ГОСТ 24643-81 устанавливает 16 степеней точности формы и расположения поверхностей. В зависимости от соотношения  $T_{\phi}/T_p$  допуска формы  $T_{\phi}$  и размера различают нормальную (А), повышенную (В), высокую (С) и особо высокую геометрическую точность поверхности. При нормальной геометрической точности допуск формы составляет 60 % допуска на размер, при повышенной 40 %, при высокой 25 %, а при особо высокой точности он составляет менее 25 %. Если допуск геометрической формы практически равен допуску на размер и соотношение допусков составляет порядка 100 %, то геометрическая точность поверхности считается грубой (Г) [8].

3.2. *Волнистость поверхности* – это совокупность периодически повторяющихся неровностей поверхности на участках длиной от 1 до 10 мм. Волнистость оценивают двумя параметрами: высотой волнистости  $W_z$  и шагом волнистости  $S_w$ .

Высота волнистости  $W_z$  – это среднее арифметическое из пяти ее значений, определенных на длине участка измерения  $L_w$ :

$$W_z = \frac{(W_1 + W_2 + W_3 + W_4 + W_5)}{5}.$$

В свою очередь, средний шаг волнистости  $S_w$  – среднее значение расстояний  $S_{wi}$  между одноименными сторонами соседних волн, измеренных по средней линии профиля:

$$S_w = \frac{\sum_{i=1}^5 S_{wi}}{5}.$$

Причиной появления волнистости поверхности являются вибрации в технологической системе станок – приспособление – инструмент – деталь, которые возникают при наличии неуравновешенных масс, при колебании составляющих сил резания и других факторах.

3.3. *Шероховатость поверхности (микрogeометрические отклонения)* – это совокупность микронеровностей с относительно малыми шагами, образующая рельеф поверхности детали на участках длиной до 1 мм.

Шероховатость поверхности, как и волнистость, представляет собой периодически повторяющиеся на поверхности выступы и впадины. Отличие между волнистостью и шероховатостью можно условно выявить по отношению шага неровностей  $S_w$  к высоте неровностей  $W_z$ . Если

$S_w / W_z < 50$ , то такие отклонения относят к шероховатости поверхности, если  $1000 < S_w / W_z < 50$  – к волнистости, а при  $S_w / W_z > 1000$  – имеют место макрогеометрические отклонения формы [21].

Шероховатость обработанной поверхности является совокупным следствием ряда факторов – пластической деформации поверхностного слоя при образовании стружки, копирования профиля вершины режущего инструмента и его трения о деталь, – а также следствием вибраций, неоднородности материала заготовки и других причин.

Количественно шероховатость поверхности оценивается независимо от способа получения поверхности. Согласно ГОСТ 2789 для оценки шероховатости поверхности детали предусматриваются следующие параметры:

– высотные:  $R_a$  – среднее арифметическое отклонение профиля [мкм],  $R_z$  – высота неровностей профиля по 10 точкам [мкм],  $R_{max}$  – наибольшая высота профиля [мкм];

– шаговые:  $S$  – средний шаг неровностей профиля по вершинам [мм],  $S_m$  – средний шаг неровностей профиля по средней линии [мм];  $t_p$  – относительная опорная длина профиля [мм].

Все измерения производятся в пределах базовой длины  $l$ , используемой для выделения неровностей, характеризующих параметры шероховатости рассматриваемой поверхности детали.

Для многих типов поверхностей, обработанных различными методами, неровности, относимые к шероховатости, имеют устойчивую связь средних шагов с высотными параметрами, что позволяет увязать значения базовой длины со значениями высотных параметров (табл. 2.1).

Таблица 2.1

Значения высотных параметров шероховатости и базовой длины

Значения высотных параметров		Базовая длина, $l$ , мм
$R_a$ , мкм	$R_z, R_{max}$ , мкм	
До 0,025	До 0,10	0,08
Св. 0,025 до 0,4	Св. 0,10 до 1,6	0,25
Св. 0,4 до 3,2	Св. 1,6 до 12,5	0,8
Св. 3,2 до 12,5	Св. 12,5 до 50	2,5
Св. 12,5 до 100	Св. 50 до 400	8

*Среднее арифметическое отклонение профиля  $R_a$*  – среднее арифметическое из абсолютных значений отклонений точек профиля у от средней линии в пределах базовой длины  $l$  определяется по формуле

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |y(x)| dx \text{ или приближенно } R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i|.$$

Высота неровностей профиля по десяти точкам  $R_z$  – сумма средних арифметических абсолютных отклонений точек пяти наибольших минимумов  $H_{imin}$  и пяти наибольших максимумов  $H_{imax}$  профиля в пределах базовой длины  $l$ :

$$R_z = \frac{1}{5} \left[ \sum_{i=1}^5 |H_{imax}| + \sum_{i=1}^5 |H_{imin}| \right].$$

где  $H_{imax}$ ,  $H_{imin}$  – ординаты соответственно пяти высших и пяти низших точек в пределах базовой длины, измеренные от линии, эквидистантной средней линии. Наибольшая высота неровностей профиля  $R_{max}$  – расстояние между наивысшей точкой выступов и наинизшей точкой впадин профиля в пределах базовой длины:

$$R_{max} = H_{imax} - H_{imin}.$$

Нормирование шероховатости по параметру  $R_z$  в пределах  $R_z = 320 \dots 20$  мкм применяют для относительно грубых поверхностей, полученных на заготовках или после выполнения черновой, предварительной обработки.

Нормирование шероховатости по параметру  $R_a$  в пределах  $R_a = 2,5 \dots 0,025$  мкм применяют для нормальных чистых поверхностей, полученных в результате выполнения получистовой, чистовой или отделочной обработки.

При особо высоких требованиях к шероховатости поверхности нормирование опять осуществляют по параметру  $R_z$  в пределах  $R_z = 0,01 \dots 0,032$  мкм.

Между значениями параметров шероховатости  $R_a$  и  $R_z$  существуют соотношения, представленные в табл. 2.2, использование которых позволяет переходить от одного нормируемого параметра к другому.

Таблица 2.2

Соотношения между значениями параметров шероховатости  $R_a$  и  $R_z$

Пределы изменения $R_a$ , мкм	$R_z$	Пределы изменения $R_z$ , мкм	$R_a$
$80 \leq R_a \leq 2,5$	$4 R_a$	$320 \leq R_z \leq 10$	$0,25 R_z$
$2,5 < R_a \leq 0,010$	$5 R_a$	$10 < R_z \leq 0,05$	$0,20 R_z$

В зависимости от соотношения между параметром шероховатости  $R_a$  и полем допуска на размер  $T_p$  различают следующие уровни геометрической точности поверхности:

$R_a \leq 0,1 T_p$  – грубая (Г);  $R_a \leq 0,05 T_p$  – нормальная (А);

$R_a \leq 0,025 T_p$  – повышенная (В);  $R_a \leq 0,012 T_p$  – высокая (С).

Требования к шероховатости поверхности конкретной детали устанавливаются на основе знания связи параметров шероховатости с функциональным назначением данной поверхности. Необоснованное завышение требований по шероховатости поверхности приводит к удорожанию изготавливаемой детали и выпускаемого изделия.

Между рассмотренными параметрами геометрической точности деталей существует функциональная и количественная связь. Допуск на размер детали  $T_p$  представляет собой интегральный параметр точности, который ограничивает все три вида геометрических отклонений (рис. 2.9). Допуск на размер по величине превышает допуски на относительный поворот  $T_n$  и на отклонения геометрической формы  $T_f$  поверхностей, между которыми проставлен данный размер  $T_p > (T_n, T_f)$ . При этом отклонения относительного поворота  $T_n \Rightarrow (T_\lambda, T_\beta)$  формируются в двух координатных плоскостях:  $T_\lambda$  в плоскости  $YOZ$  и  $T_\beta$  в плоскости  $XOZ$ .

Для правильной оценки параметров геометрической точности детали их измерение выполняются в определенной последовательности. Вначале измеряют микрогеометрические отклонения (шероховатость поверхности). Затем измеряют волнистость и макрогеометрические отклонения формы в пределах габаритов рассматриваемой поверхности. После этого из-

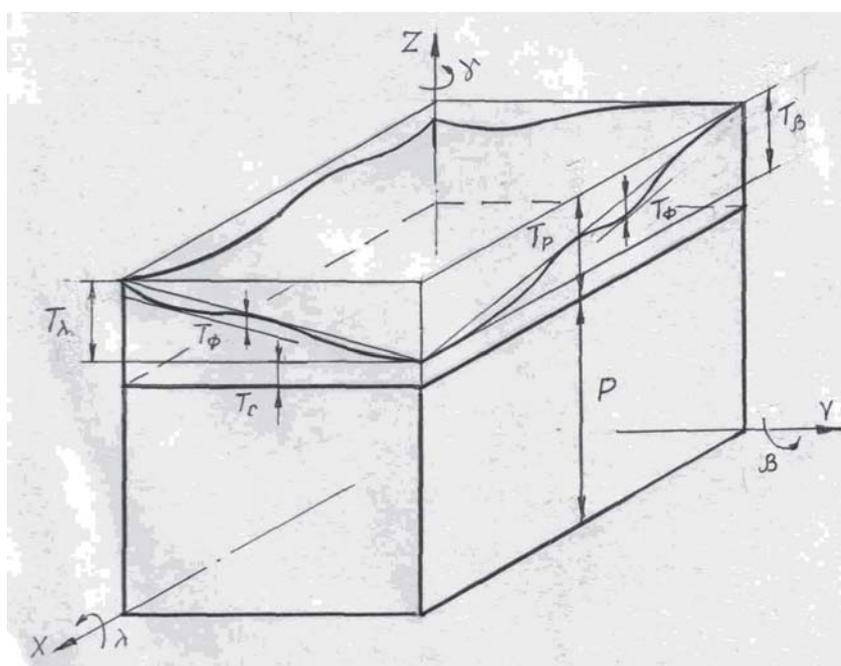


Рис. 2.9. Расположение составляющих допуска  $T_p$  на линейный размер  $P$ :  $T_f$  – составляющие, ограничивающие отклонения геометрической формы;  $T_\lambda$  и  $T_\beta$  – составляющие, ограничивающие отклонения относительных поворотов в двух координатных плоскостях;  $T_c$  – составляющая допуска на линейный размер, определяющая параллельное смещение прилегающей плоскости

мерение выполняются в определенной последовательности. Вначале измеряют микрогеометрические отклонения (шероховатость поверхности). Затем измеряют волнистость и макрогеометрические отклонения формы в пределах габаритов рассматриваемой поверхности. После этого из-

меряют отклонения относительного поворота и точность полученного размера.

Для исключения влияния микрогеометрических отклонений на измерение точности геометрической формы используется индикатор с плоским наконечником, который перекрывает одновременно несколько гребешков.

Для исключения влияния погрешности формы на точность измерения относительного поворота измерение относительного поворота следует выполнять в пределах габаритных размеров рассматриваемой поверхности (рис. 2.10, *а*). С этой целью применяют пузырьковый или

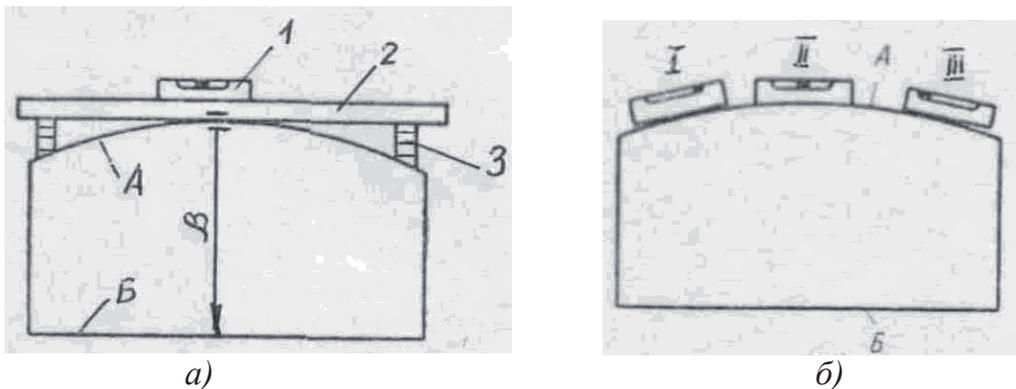


Рис. 2.10. Схема измерения точности относительного поворота поверхности: *а* – правильная, при которой исключается влияние макрогеометрических отклонений; *б* – неправильная, при которой макрогеометрические отклонения искажают правильность измерения

электронный уровень 1, устанавливаемый на линейку 2, которую, в свою очередь, устанавливают на равные по высоте мерные плитки 3. В случае установки уровня непосредственно на поверхность детали (рис. 2.10, *б*) показания прибора в каждом из трех положений I, II, III будут различны по величине и не смогут соответствовать фактическому значению углового отклонения всей рассматриваемой поверхности.

### Вопросы для самопроверки

1. Что следует понимать под служебным назначением изделия?
2. На основе чего устанавливают технические требования на изделие?
3. Что такое исполнительные поверхности изделия?
4. Назовите четыре вида поверхностей деталей машин, определяемых их функциональным назначением.
5. Что следует понимать под качеством машины?
6. Назовите основные показатели качества машины.
7. Что следует понимать под точностью детали?

8. Что такое допускаемые предельные отклонения?
9. Что определяет допуск на параметр точности детали?
10. Назовите параметры геометрической точности деталей машин.
11. Как оценивается точность относительного поворота поверхностей деталей машин?
12. Что такое макрогеометрические отклонения?
13. Какими параметрами оценивают шероховатость поверхности деталей машин?

## Глава 3. БАЗИРОВАНИЕ И БАЗЫ В МАШИНОСТРОЕНИИ

Для достижения качественной работы машин необходимо обеспечить требуемую точность относительного положения и движения деталей, входящих в изделие. Поэтому при сборке машин, изготовлении ее деталей и ремонте возникает задача соединения деталей и узлов с требуемой точностью. Аналогичная задача возникает и при изготовлении деталей на станках, когда на станок требуется установить с требуемой точностью приспособление, заготовку и инструмент.

Под *базированием* понимают придание детали требуемой точности относительно положения при лишении ее всех шести степеней свободы. В свою очередь поверхность или сочетание поверхностей, а также ось или точка, принадлежащие заготовке, детали или изделию, которые используют для базирования, называют базами.

Принципы базирования различных по геометрии деталей в машинах и заготовок на станках при выполнении различных технологических операций одинаковы и определяются теорией баз [4, 5].

Различные по форме и размерам детали машин в общем случае могут быть забазированы по одной из трех типовых схем:

- 1) базирование по трем плоскостям (базирование в координатный угол);
- 2) базирование с использованием двойной опорной базы;
- 3) базирование с использованием двойной направляющей базы.

### 3.1. Типовые схемы базирования деталей и узлов машин

#### 1. Базирование по трем плоскостям (в координатный угол)

При этой схеме происходит совмещение трех базовых поверхностей присоединяемой детали с тремя поверхностями базовой детали.

Любое твердое тело, расположенное в пространстве, например призматическая деталь (рис. 3.1), имеет шесть степеней свободы, определяемых вектором подвижности:

$$\eta = (a, b, c, \lambda, \beta, \gamma),$$

где  $a, b, c$  – параметры смещения в направлении соответствующих координатных осей  $X, Y, Z$ ;

$\lambda$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  – параметры поворота вокруг соответствующих координатных осей.

Лишение детали в процессе базирования всех шести степеней свободы достигается путем наложения на нее двухсторонних связей. Рассмотрим это на примере

призматической детали, представленной на рис. 3.1. Если на базирующей поверхности детали  $XOY$  взять точку 1 и связать ее с соответствующей точкой 1', расположенной в координатной плоскости  $XOY$ , то деталь будет лишена одной степени свободы параметра  $c$ , то есть возможности перемещения в направлении оси  $Z$ . Если аналогично на плоскости  $XOY$  взять точку 2 и наложить на нее двухстороннюю связь, то деталь будет лишена второй степени свободы параметра  $\beta$  – возможности вращения вокруг оси  $y$ . Возьмем на плоскости  $XOY$  детали точку 3 и также наложим на нее двухстороннюю связь. В результате деталь будет лишена еще одной степени свободы – параметра  $\lambda$ , то есть возможности поворота вокруг оси  $X$ . При этом можно заметить, что наложение двухсторонней связи на любую из последующих точек, расположенных на плоскости  $XOY$ , не отнимет у детали дополнительных степеней свободы.

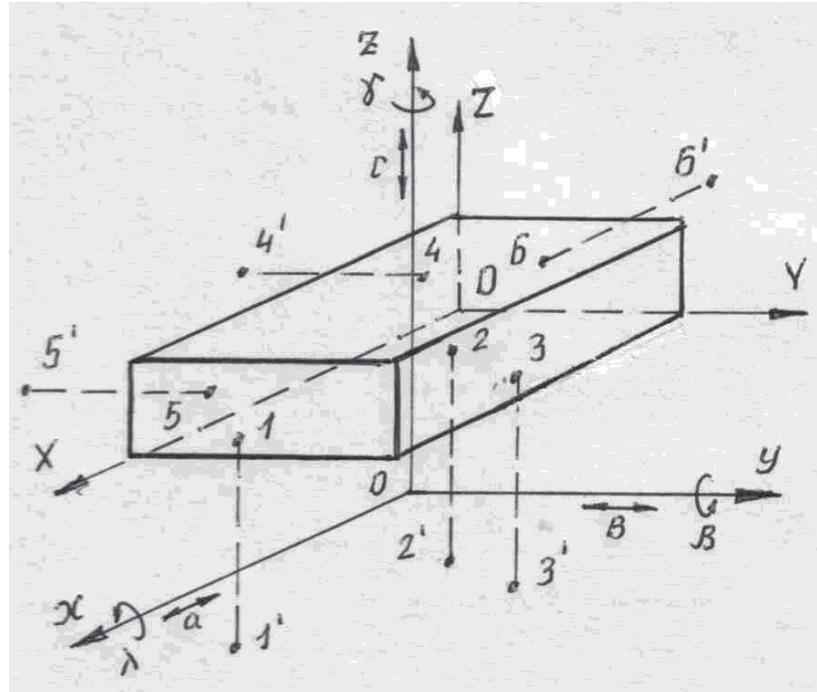


Рис. 3.1. Базирование призматической детали по трем плоскостям

Таким образом, лишения детали соответствующих степеней свободы при базировании достигают путем положения на нее двухсторонних связей.

Базирующая поверхность, на которой располагаются три опорные точки  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$ , отнимающие у детали три степени свободы – одно смещение, например  $c$ , и два поворота, например  $\beta$  и  $\lambda$ , – называется *установочной базой*:

$$\begin{bmatrix} T1 \\ T2 \\ T3 \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} c \\ \beta \\ \lambda \end{bmatrix}.$$

В рассматриваемом примере установочной базой является плоскость  $XOY$ . Геометрическим признаком установочной базы является плоская поверхность, имеющая наибольшую площадь, у которой с целью сокращения погрешности установки опорные точки следует располагать на наибольшем расстоянии друг от друга.

Для лишения детали оставшихся степеней свободы возьмем на координатной плоскости  $XOZ$  точку 4 и наложим двухстороннюю связь, связав ее с соответствующей точкой 4', расположенной в плоскости  $XOZ$ . В результате деталь будет лишена еще одной степени свободы – параметра  $b$ , что исключает возможность ее перемещения в направлении оси  $Y$ .

Затем возьмем на плоскости  $XOZ$  точку 5 и свяжем ее с соответствующей точкой 5'. Это позволит наложить на деталь еще одну связь, которая исключает возможность поворота детали вокруг оси  $Z$  и отнимает еще одну степень свободы – параметр  $\gamma$ . Точку 5 следует выбирать так, чтобы прямая, проходящая через точки 4 и 5, была параллельна оси  $X$ . При этом следует заметить, что если на плоскости  $XOZ$  выбрать дополнительную опорную точку, то это не позволит отнять у детали оставшуюся степень свободы –  $a$ .

Базирующая поверхность, на которой располагаются две опорные точки  $T4, T5$ , отнимающие у детали две степени свободы – одно смещение, например  $b$ , и один поворот  $\gamma$ , – называется *направляющей базой*:

$$\begin{bmatrix} T4 \\ T5 \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} b \\ \gamma \end{bmatrix}.$$

В данном случае направляющей базой является координатная плоскость  $XOZ$ . Геометрическим признаком направляющей базы является плоская поверхность наибольшей протяженности, на которой с целью уменьшения погрешности установки опорные точки следует располагать на наибольшем расстоянии друг от друга по прямой, параллельной установочной базе.

Для лишения детали последней степени свободы – возможности перемещения в направлении оси  $X$  (параметр  $a$ ), – возьмем на координатной плоскости  $YOZ$  точку 6 и свяжем ее с соответствующей точкой 6' на координатной плоскости  $YOZ$ .

Базирующая поверхность, на которой располагается одна опорная

точка  $T_6$ , отнимающая у детали одну степень свободы (смещение или поворот), называется *опорной базой*:

$$[T_6] \Rightarrow [a].$$

В данном случае опорной базой является координатная плоскость  $YOZ$ . В качестве опорной базы может быть выбрана поверхность детали с малой площадью.

При контакте базирующих поверхностей присоединяемой и базовой детали, теоретически опорные точки  $T_1, T_2, \dots, T_6$  проявляются как точки контакта, а схема базирования по трем плоскостям (в координатный угол) условно обозначается как показано на рис. 3.2.

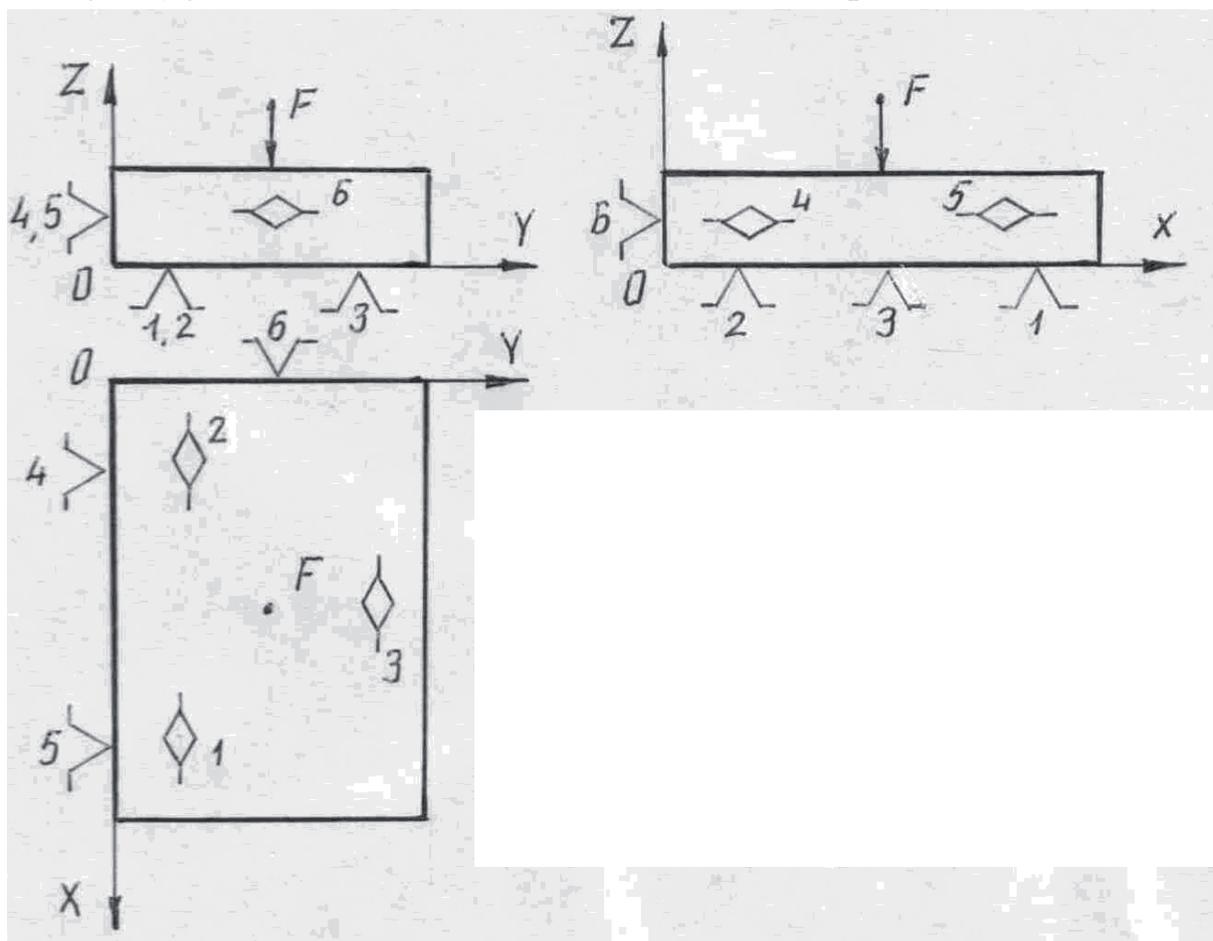


Рис. 3.2. Схема расположения опорных точек при базировании детали типа плитки по трем плоскостям:  $\triangle$  опорная точка вид сбоку;  $\diamond$  опорная точка сверху;  $\triangle$  подводимая опорная точка вид сбоку;  $\diamond$  подводимая опорная точка вид сверху;  $\downarrow F$  силовое замыкание

## 2. Базирование с использованием двойной опорной базы

Для этой схемы базирования характерным является совмещение центра базовой поверхности присоединяемой детали с центром соответствующей поверхности базовой детали. Базирование с использо-

ванием двойной опорной базы применяется для определения положения в изделии таких деталей, как подшипники, фланцы, кольца, зубчатые колеса с относительно короткой ступицей, а также базирования деталей типа диска (шестерни) в трехкулачковом патроне. Совмещение центра (центрирование) обеспечивает двойная опорная база. Например, центр наружного кольца подшипника совмещается с центром отверстия в корпусе, центр базового отверстия в шестерне совмещается с центром посадочной шейки вала. Наглядной иллюстрацией данной схемы базирования является базирование детали типа диска в самоцентрирующемся трехкулачковом патроне (рис. 3.3).

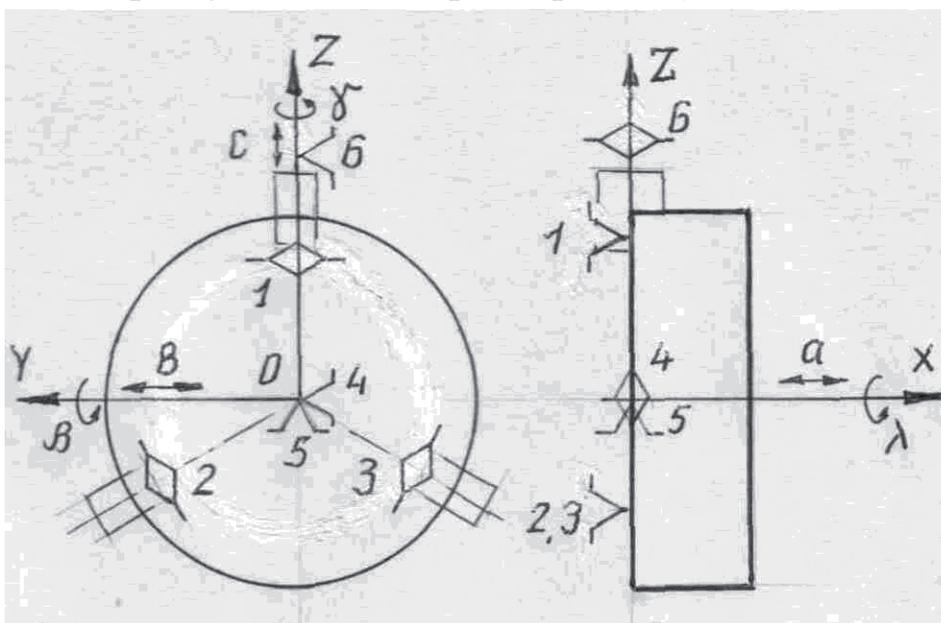


Рис. 3.3. Базирование диска с использованием двойной опорной базы

В данном случае торец диска, определяемый координатной плоскостью  $YOZ$ , является установочной базой, на которой располагаются три опорные точки  $T1, T2, T3$ , отнимающие у детали три степени свободы – возможность перемещения в направлении оси  $X$  (параметр  $a$ ) и возможность поворота вокруг осей  $Y$  и  $Z$  (параметры  $\beta$  и  $\gamma$ ):

$$\begin{bmatrix} T1 \\ T2 \\ T3 \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} a \\ \beta \\ \gamma \end{bmatrix}.$$

В процессе закрепления детали, при одновременном перемещении по радиусу в направлении центра трех самоцентрирующихся кулачков, происходит совмещение центра устанавливаемой детали с центром па-

трона. В результате у детали отнимается две степени свободы – перемещение в направлении оси  $Y$  (параметр  $b$  – опорная точка  $T4$ ) и перемещение в направлении оси  $Z$  (параметр  $c$  – опорная точка  $T5$ ). Таким образом, центр детали, в котором располагается начало координат системы  $XYZ$ , выполняет роль двойной опорной базы:

$$\begin{bmatrix} T4 \\ T5 \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} b \\ c \end{bmatrix}.$$

Базирующая поверхность, на которой располагаются две опорные точки, отнимающая у детали две степени свободы – два смещения в направлении двух координатных осей, – называется *двойной опорной базой*. Таким образом, двойная опорная база обеспечивает центрирование присоединяемой детали, и в данном случае совмещение центра устанавливаемого диска с центром патрона.

Для лишения детали оставшейся степени свободы – возможности вращения  $\lambda$  вокруг оси  $X$  – используется опорная база – координатная плоскость  $XOZ$ , на которой располагается точка  $T6$ :

$$[T6] \Rightarrow [\lambda].$$

Базирование с использованием двойной опорной базы широко применяется как для базирования деталей типа дисков, фланцев, зубчатых колес, а также и для базирования корпусных деталей (рис 3.4). Это одна

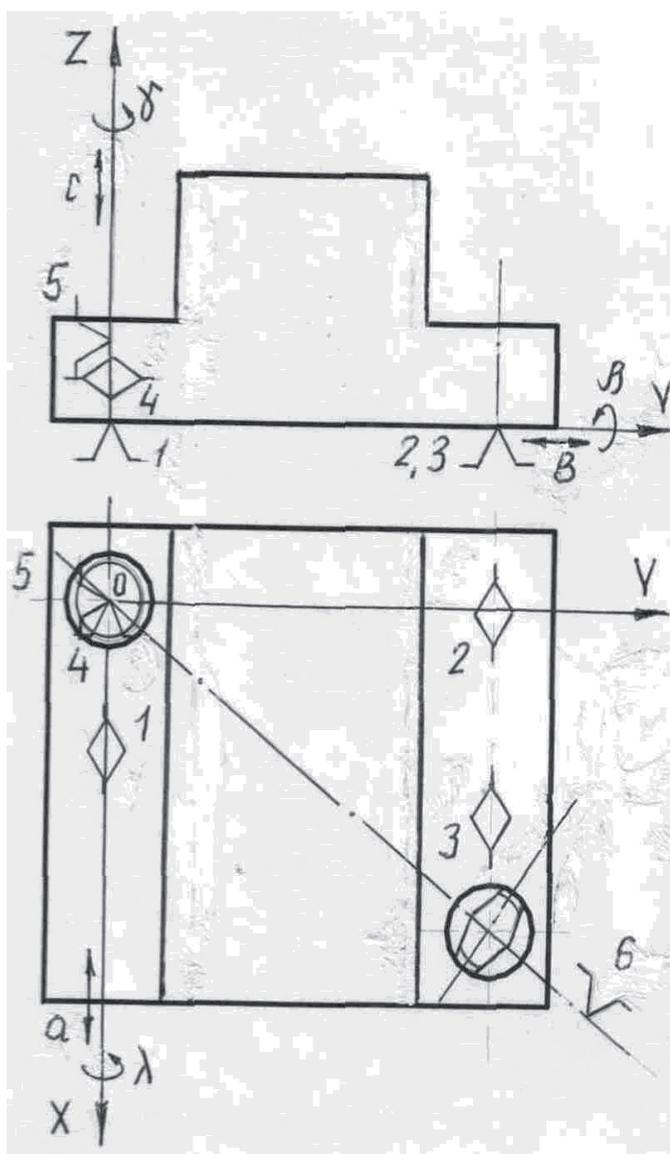


Рис. 3.4. Схема базирования корпусной детали по плоскости и двум базовым отверстиям

из наиболее распространенных схем базирования, которая используется для определения положения корпусных деталей как в конструкциях машин, так и на станках при механической обработке. Такая схема имеет второе название – *базирование по плоскости и двум базовым отверстиям*.

Координатная плоскость  $XOY$  является установочной базой – опорные точки  $T1, T2, T3$ . В одно базовое отверстие входит цельный (цилиндрический) палец. Это отверстие выполняет роль двойной опорной базы – точки  $T4, T5$ , отнимающие два смещения  $a$  и  $b$  в направлении координатных осей  $X$  и  $Y$ . Во второе базовое отверстие входит срезанный (ромбический) палец, и оно выполняет роль опорной базы – точка  $T6$ , отнимающая возможность вращения  $\gamma$  вокруг оси  $Z$ .

Базовые отверстия для корпусных деталей требуют точного изготовления по качеству  $IT-7$ .

### 3. Базирование с использованием двойной направляющей базы

Базирование по этой схеме обеспечивает совмещение оси базовой поверхности присоединяемой детали с осью соответствующей поверхности базовой детали. Такая схема широко применяется для определения положения длинных деталей тел вращения. Примером этого является базирование вала на опорных шейках в подшипниках, базирование заготовки вала в центрах или на призмах.

На рис. 3.5 представлена схема базирования вала в призматическом схвате робота с использованием двойной направляющей базы

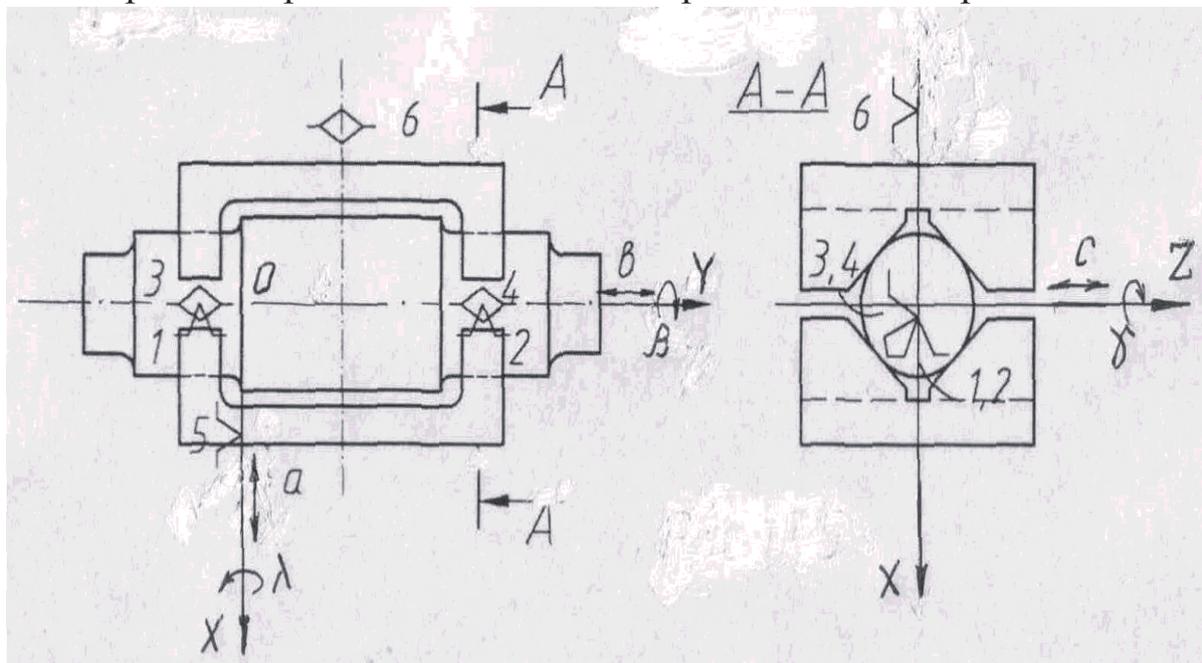


Рис. 3.5. Базирование валика в призматическом схвате робота с использованием двойной направляющей базы

схвате работа с использованием двойной направляющей базы. Наличие в захвате двух самоцентрирующихся призматических губок позволяет при захвате вала обеспечить совмещение оси вала с осью призматического захвата. Таким образом, ось  $OY$  является двойной направляющей базой. Опорные точки  $T1, T2$  обеспечивают направление оси вала в координатной плоскости  $XOY$ , отнимая у детали смещение  $a$  в направлении оси  $X$  и поворот  $\gamma$  вокруг оси  $Z$ . Опорные точки  $T3, T4$  обеспечивают направление оси вала в координатной плоскости  $YOZ$ , отнимая у детали смещение  $c$  в направлении оси  $Z$  и поворот  $\lambda$  вокруг оси  $X$ :

$$\begin{bmatrix} T1 \\ T2 \\ T3 \\ T4 \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} a \\ \gamma \\ c \\ \lambda \end{bmatrix}.$$

Базирующая поверхность, на которой располагаются четыре опорные точки, отнимающие у детали четыре степени свободы – два смещения и два поворота в двух перпендикулярных плоскостях, – называется *двойной направляющей базой*.

Помимо двойной направляющей базы в рассматриваемый комплект баз входят также две опорные базы, одна из которых отнимает одно смещение  $b$ , а вторая один поворот  $\beta$ . Плоскость  $XOZ$  – опорная база (точка  $T5$ ) отнимает у вала смещение  $[T5] \Rightarrow [b]$  в направлении оси  $Y$ . В свою очередь, плоскость  $YOZ$  – опорная база (точка  $T6$ ) отнимает у вала смещение  $[T6] \Rightarrow [b]$  в направлении оси  $Y$ .

Анализ рассмотренных трех типовых схем базирования показывает, что все они имеют общую закономерность, которая формулируется как правило шести точек.

*Правило шести точек:* для лишения детали всех шести степеней свободы, определяемых вектором  $\eta = (a, b, c, \lambda, \beta, \gamma)$ , необходимо и достаточно наличие шести теоретических опорных точек, которые располагаются на трех базирующих поверхностях, образующих комплект баз одной из трех типовых схем базирования.

### 3.2. Классификация баз

#### *Классификация баз по отбираемым степеням свободы*

Рассмотренные выше пять базирующих поверхностей, с помощью которых может быть образован любой из трех комплектов баз, можно

классифицировать по отбираемым степеням свободы, что показано в таблице

Классификация баз по отбираемым степеням свободы

№ п/п	Базирующие поверхности	Количество опорных точек	Отнимаемые степени свободы	
			Смещения $a, b, c$	Повороты $\lambda, \beta, \gamma$
1	Установочная база	3	Одно	Два
2	Направляющая база	2	Одно	Один
3	Опорная база	1	Одно смещение или один поворот	
4	Двойная опорная база	2	Два	–
5	Двойная направляющая база	4	Два	Два

### **Классификация баз по характеру их конструктивного оформления**

По характеру конструктивного оформления базы различают *явные* и *скрытые*. Под явными базами понимают конструктивно оформленные базирующие поверхности деталей, линии или точки разметки. При обозначении схем базирования с использованием явных баз теоретические опорные точки располагают непосредственно на базирующих поверхностях или линиях разметки.

Под скрытой базой понимается плоскость симметрии, ось симметрии или точка, мысленно проводимые по перпендикуляру к конструктивно оформленным базам для доведения общего числа теоретически опорных точек до шести.

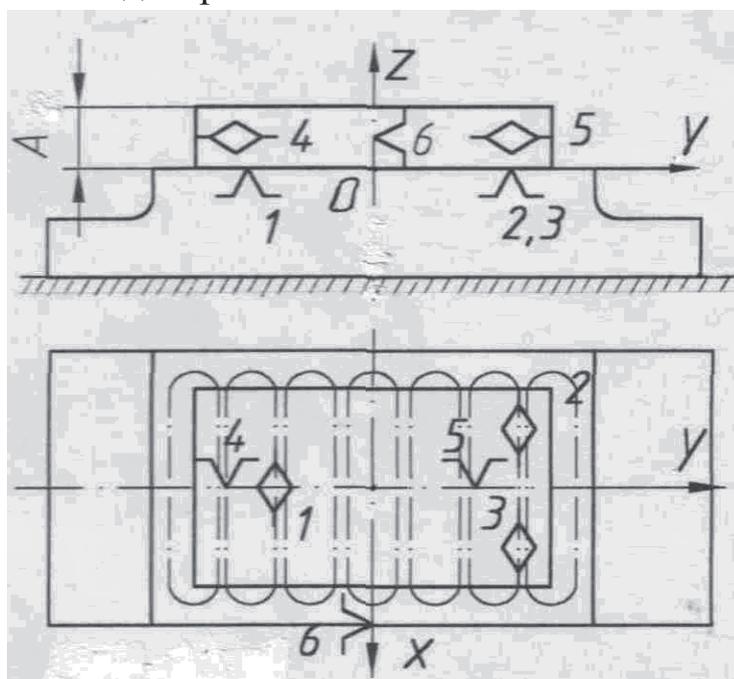


Рис. 3.6. Базирование призматической детали на магнитном столе с использованием скрытых баз

Таким образом, к скрытым базам прибегают в тех случаях, когда требуется определить положение детали по воображаемой плоскости, оси или точке.

На рис. 3.6 приведен пример базирования

при плоском шлифовании призматической детали на магнитном столе с использованием скрытых баз. Установочная база детали является конструктивно оформленной – явной, а остальные две базы являются скрытыми. Роль скрытой направляющей базы (точки  $T4$ ,  $T5$ ) в данном случае выполняет плоскость симметрии детали, которая устанавливается вдоль оси стола. Роль опорной скрытой базы (точка  $T6$ ) выполняет другая плоскость симметрии, определяющая положение детали в центре стола.

### ***Классификация баз по функциональному назначению***

В зависимости от функционального назначения базы делят на конструкторские, технологические и измерительные.

*Конструкторские базы* – это базы, которые используют для определения положения детали или сборочной единицы в изделии. Следует различать основные и вспомогательные конструкторские базы. С помощью основных конструкторских баз осуществляется базирование самой детали или сборочной единицы в изделии, а с помощью вспомогательных баз определяется положение других деталей, присоединяемых к данной.

*Технологические базы* – это базы, которые используют для определения положения заготовки при обработке ее на станке, а также для определения положения детали или сборочной единицы в процессе выполнения сборки или ремонта.

На рис. 3.7 представлена схема базирования вала в центрах при токарной обработке. Технологическими базами, определяющими положение вала, являются центровые гнезда (двойная направляющая база  $T1$ ,  $T2$ ,  $T3$ ,  $T4$ ), торец (опорная база  $T5$ ) и опорная база  $T6$ , создаваемая поводком для вращения вала.

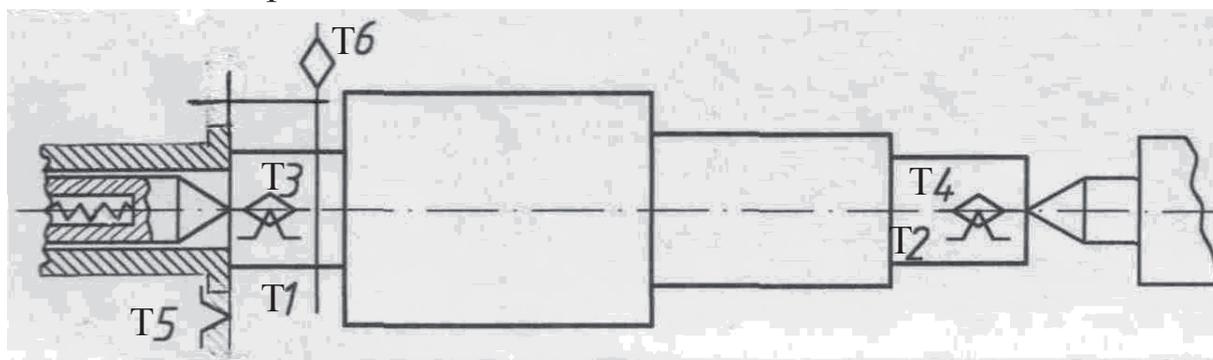


Рис. 3.7. Базирование валика на токарном станке в центрах по технологическим базам

*Измерительные базы* – это базы, которые используют для определения положения измеряемой детали или измерительного прибора при

выполнении измерений. На рис. 3.8 представлена схема измерения параллельности плоскости А относительно плоскости Б с помощью индикатора на стойке. Измерительной базой в данном случае является плоскость детали Б, на которой базируется стойка с индикатором.

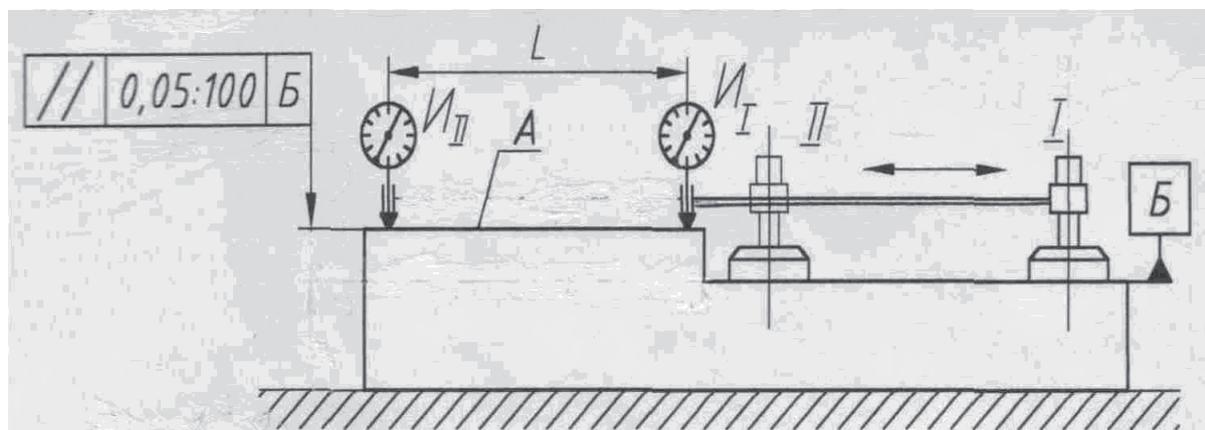


Рис. 3.8. Схема базирования стойки с индикатором на измерительной базе при контроле угловых отклонений

Измерение расстояний и поворотов какой-либо поверхности детали всегда производится относительно каких-либо других ее поверхностей. В соответствии с этим в качестве измерительных баз используют поверхности или заменяющие их сочетания поверхностей детали, относительно которых производят измерение расстояний, поворотов или отклонений геометрической формы детали.

Создание двухсторонних связей, обеспечивающих лишение присоединяемой детали всех шести степеней свободы и сохранение неизменности ее положения относительно базовой детали, достигается путем приложения силового замыкания – усилий закрепления. В результате достигается *определенность базирования*, под которой понимается неизменность положения детали относительно поверхностей вспомогательных баз другой базовой детали. Для создания силового замыкания применяют различные зажимные устройства с использованием упругих сил, создаваемых резьбовыми соединениями, сил тяжести, сил трения, сил сжатого воздуха, гидравлики, электромагнитных сил и их комбинаций.

*Неопределенность базирования* детали означает единичное или многократное изменение требуемого положения детали относительно сопрягаемых поверхностей базовой детали. Неопределенность базирования характеризуется нарушением контакта по сопрягаемым базовым поверхностям. Она проявляется в основном на подвижных деталях, у которых в соединениях на основных базах предусматриваются опре-

деленные зазоры для осуществления заданных перемещений. Характерными примерами проявления неопределенности базирования являются радиальные и осевые биения вращающихся валов, шпинделей, текущая погрешность установки перемещаемых столов, кареток, ползунов. На рис. 3.9 показана схема пространственных отклонений стола продольно-фрезерного станка при его перемещении вдоль оси  $OX$ . Эти перемещения определяют составляющие вектора текущей погрешности установки (погрешности позиционирования) стола  $\omega_{\text{п}}$ , которые включают линейные  $a_{\text{п}}$ ,  $b_{\text{п}}$ , и  $c_{\text{п}}$  и угловые  $\lambda_{\text{п}}$ ,  $\beta_{\text{п}}$ ,  $\gamma_{\text{п}}$  отклонения относительно трех координатных осей:

$$\omega_{\text{п}} = (a_{\text{п}}, b_{\text{п}}, c_{\text{п}}, \lambda_{\text{п}}, \beta_{\text{п}}, \gamma_{\text{п}}).$$

С неопределенностью базирования подвижных деталей и узлов станков, машин приходится считаться. Она оговаривается в технических требованиях на изготовление изделия и регламентируется соответствующими стандартами на приемку оборудования. Для снижения неопределенности базирования выполняют регулировку зазоров в направляющих станков, регулировку радиальных и осевых зазоров в подшипниковых опорах.

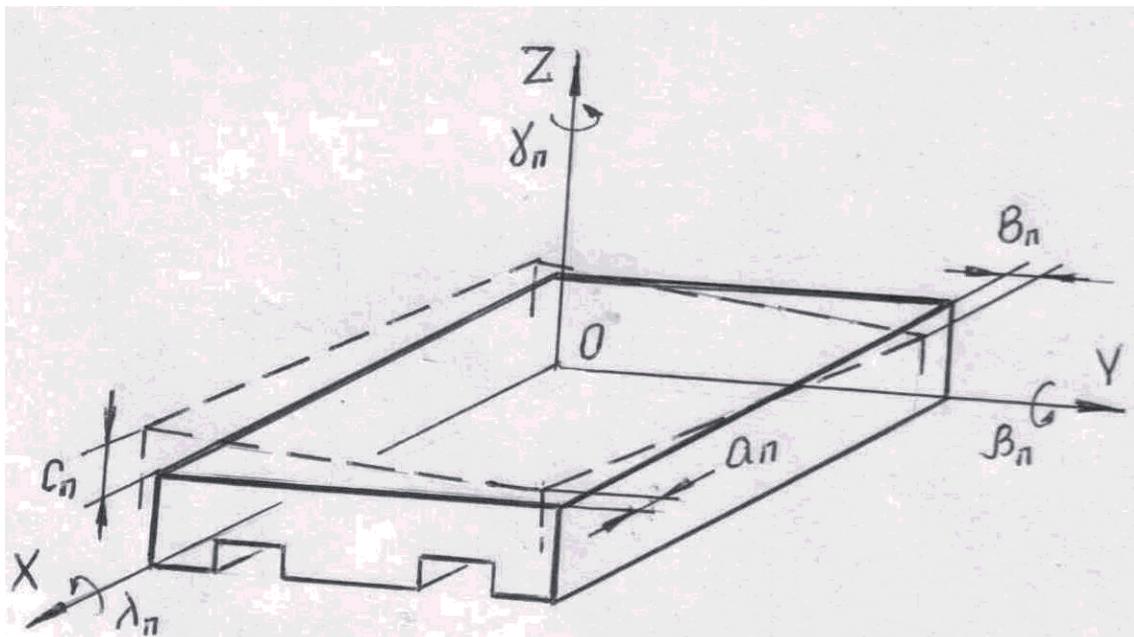


Рис. 3.9. Схема формирования пространственных отклонений стола станка, обусловленных неопределенностью его базирования, при продольном перемещении

При соприкосновении реальных базирующих поверхностей соединяемых деталей на их базовых поверхностях возникают контактные деформации. Причиной этого является наличие на базовых поверхно-

стях погрешности геометрической формы в виде волнистости, макро- и микрогеометрических отклонений. Величина контактных деформаций в отдельных случаях может быть соизмерима с требованиями точности обработки детали и достигать значений 0,002...0,03 мм и более. Поэтому, с целью достижения повышенной точности, перед выполнением ответственных финишных операций для ряда деталей выполняют окончательную отделку их базовых поверхностей шлифованием.

При приложении силового замыкания наряду с контактными деформациями на базирующих поверхностях возникают собственные упругие деформации закрепляемых деталей. Обработка заготовки в деформируемом состоянии приводит к тому, что после выполнения операции и раскрепления детали на обработанной поверхности возникают отклонения геометрической формы, обусловленные созданными упругими деформациями заготовки. Для исключения этого точки приложения силового замыкания необходимо располагать непосредственно над опорными элементами приспособления. На рис. 3.10 представлены две схемы закрепления станины токарного станка на операции шлифования направляющих.

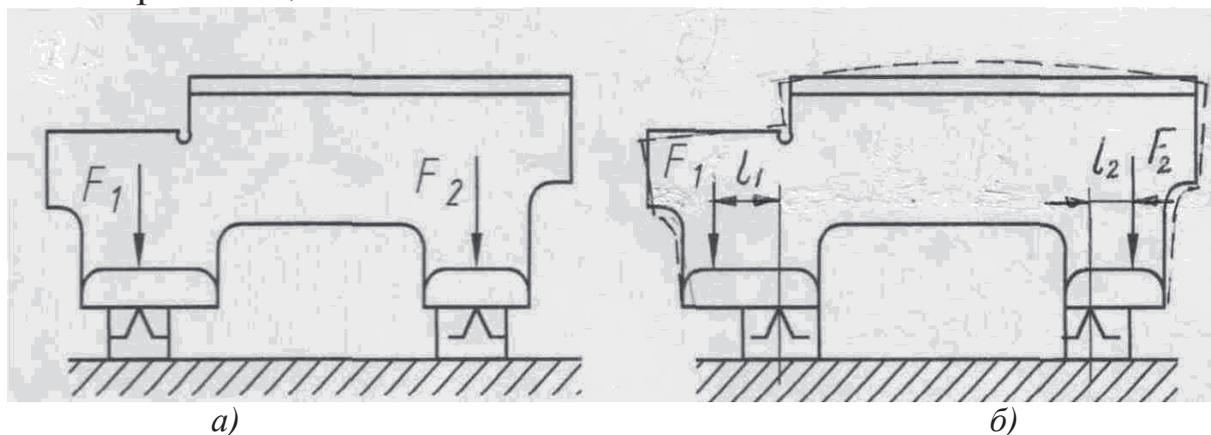


Рис. 3.10. Схема приложения силового замыкания при закреплении станины: *а* – правильная; *б* – неправильная

При закреплении станины согласно схеме на рис. 3.10, *а* деформации станины от сил закрепления практически отсутствуют, так как точки приложения силового замыкания расположены непосредственно над опорными элементами приспособления. В случае закрепления согласно схеме рис. 3.10, *б*, когда точки приложения силового замыкания смещены относительно опорных элементов приспособления на расстояниях  $l_1$  и  $l_2$ , возникают изгибающие моменты

$$M_1 = F \cdot l_1, M_2 = F \cdot l_2,$$

под действием которых происходит деформация станины и, как следствие, отклонение геометрической формы шлифуемых направляющих.

### 3.3. Смена баз

Под *сменой баз* понимается замена одних базирующих поверхностей детали или сборочной единицы другими. Различают неорганизованную и организованную смену баз.

Организованная смена баз заранее планируется, и ее результат просчитывают путем выявления и расчета соответствующих размерных цепей.

Необходимость организованной смены баз может быть обусловлена следующими причинами:

- 1) невозможность обработки различных поверхностей заготовки с одной установки;
- 2) необходимость выполнения техпроцесса обработки на разных станках;
- 3) в случае выявления экономически более целесообразного варианта достижения точности решаемой задачи;
- 4) с целью упрощения измерений и повышения их точности.

Выполнение организованной смены баз предусматривает соблюдение следующих условий:

- 1) выявление линейных и угловых размерных связей между прежними и вновь выбираемыми технологическими базами и поверхностями заготовки, подлежащими обработке;
- 2) расчет выявленных размерных связей в номиналах и в допусках с учетом выбираемого метода достижения точности;
- 3) соблюдение требуемой точности рассчитанных операционных размеров при выполнении технологического процесса.

На рис. 3.11 представлен пример организованной смены технологических баз при расточке отверстия в корпусной детали. Согласно техническим требованиям необходимо обеспечить точность положения отверстия относительно базовых поверхностей I и II (рис. 3.11, а). При первом варианте базирования заготовки эти поверхности непосредственно используют в качестве технологических баз, и в частности, поверхность I – установочная база, а поверхность II – направляющая база. В этом случае соблюдается принцип единства баз, технологические базы совпадают с конструкторскими, и в результате требуемые параметры точности детали получаются наиболее коротким путем, как замыкающие звенья технологической системы:

$$A_{\Delta} = A_1; B_{\Delta} = B_1; \alpha_{\Delta} = \alpha_1;$$

$$\omega_{A\Delta} = \omega_{A1}; \omega_{B\Delta} = \omega_{B1}; \omega_{\alpha\Delta} = \omega_{\alpha1}.$$

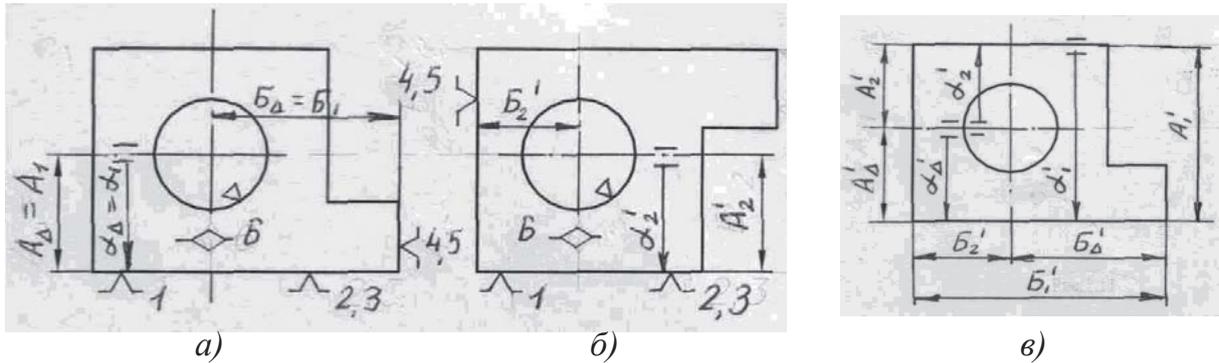


Рис. 3.11. Пример организованной смены баз и формирования дополнительных звеньев при расточке отверстия в корпусе: *а* – получение отверстия с соблюдением единства конструкторских и технологических баз; *б* – получение отверстия при организованной смене баз; *в* – схема формирования дополнительных звеньев при смене баз

При втором варианте базирования в качестве технологических баз при обработке отверстия используют противоположные поверхности (рис. 3.11, *б*), относительно которых положение отверстия определяется полученными операционными размерами  $A'_2$ ,  $B'_2$ ,  $\alpha'_2$ . В результате организованной смены баз точность положения отверстия относительно базовых поверхностей I и II будет зависеть от точности дополнительных размеров  $A'_1$ ,  $B'_1$ ,  $\alpha'_1$ , определяющих положение одних технологических баз относительно других, и рассчитываться трехзвенными технологическими цепями (рис. 3.11, *в*):

$$A'_{\Delta} = A'_1 - A'_2; B'_{\Delta} = B'_1 + B'_2; \alpha'_{\Delta} = \alpha'_1 + \alpha'_2;$$

$$\omega'_{A\Delta} = \omega'_{A_1} + \omega'_{A_2}; \omega'_{B\Delta} = \omega'_{B_1} + \omega'_{B_2}; \omega'_{\alpha\Delta} = \omega'_{\alpha_1} + \omega'_{\alpha_2}.$$

Неорганизованная смена баз происходит случайно. В большинстве случаев неорганизованная смена баз происходит в процессе установки и закрепления заготовки на столе станка или в приспособлении. Причинами этого являются погрешности размеров и геометрических форм базовых поверхностей заготовки или приспособления, неправильный выбор технологических баз, неправильное расположение опорных элементов приспособления, неправильный выбор величины, направления и последовательности приложения силового замыкания, а также недостаточная квалификация работающего.

На рис. 3.12 приведен пример неорганизованной смены баз, который часто имеет место при закреплении призматической заготовки в обычных зажимных тисках.

В результате фрезерования плоскости А необходимо обеспечить точность размера К и параллельность  $\beta$  плоскости А относительно плоскости Б, выбранной в качестве установочной технологической базы (рис. 3.12, а). В тех случаях, когда отклонение от перпендикулярности направляющей базы В относительно установочной Б определяется углом  $\alpha > 90^\circ$ , заготовка занимает требуемое положение. Направляющей базой является линия, проходящая через точку 0, а крутящие моменты от силы зажима  $P \cdot l_1$  и силы веса  $G \cdot l_2$ , направленные на установочную базу, обеспечивают определенность базирования заготовки.

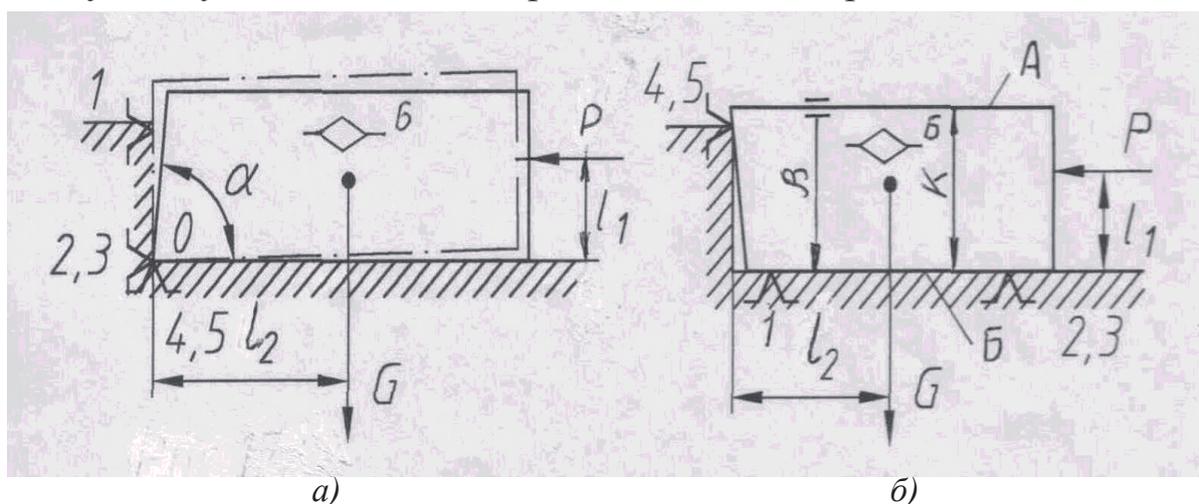


Рис. 3.12. Влияние неорганизованной смены баз на изменение положения заготовки при ее закреплении: а – неизменность положения заготовки; б – смещение заготовки при неорганизованной смене баз

Однако при наличии отклонения от перпендикулярности поверхности направляющей базы В относительно установочной базы А, когда угол  $\alpha < 90^\circ$  (рис. 3,12, б), возможно возникновение неорганизованной смены баз. Это происходит вследствие поворота заготовки вокруг точки 0, под действием момента от силы зажима  $P \cdot l_1$ , когда его значение превышает момент  $G \cdot l_2$  от силы веса и имеет противоположную направленность:

$$P \cdot l_1 > G \cdot l_2.$$

Вследствие этого происходит отрыв заготовки от установочной базы (см. рис. 3.12, б), при этом направляющая база (поверхность В) становится установочной, а поверхность Б выполняет роль направляющей базы по линии, проходящей через точку 0. Следствием этой неорганизованной смены баз являются отклонения точности размера К и относительного поворота  $\beta$ , получаемые в результате фрезерования на данной операции.

В отдельных случаях неорганизованная смена баз происходит непосредственно в процессе обработки, когда под действием сил резания и их моментов происходит смещение и поворот заготовки относительно одной или нескольких базовых поверхностей. Причиной этого являются недостаточные усилия закрепления заготовки на станке или в приспособлении, что приводит к неисправимому браку детали и возникновению аварийной ситуации.

### 3.4. Принцип единства баз

Изложенное выше показывает, что для получения коротким путем более высокой точности изготавливаемой детали следует по возможности избегать смены баз, что означает соблюдение принципа единства баз.

Согласно принципу единства баз – большинство поверхностей заготовки необходимо стремиться обрабатывать и измерять от одних и тех же технологических баз. При этом в качестве технологических баз следует использовать основные конструкторские базы детали, а в качестве измерительных баз – технологические базы, от которых получены обрабатываемые поверхности.

Важная особенность соблюдения принципа единства баз заключается в том, что при обработке с одной установки нескольких поверхностей детали получаемая точность относительного положения поверхностей не зависит от погрешности установки заготовки  $\omega_y$ . Это обстоятельство приобретает особое значение для достижения точности относительного поворота поверхностей, получаемых с одной установки.

На рис. 3.13 показана схема обработки нескольких плоских поверхностей детали набором фрез с одной установки. Согласно приведенной схеме погрешность установки заготовки  $\omega_y$  не оказывает влияния на точность одновременно получаемых линейных и угловых размеров:

$$\omega_y \notin (A_{\Delta}, \alpha_{\Delta}, B_{\Delta}, \beta_{\Delta}, K_{\Delta}, \gamma_{\Delta}).$$

Это важное преимущество эффективно используют при обработке деталей на горизонтально-расточных станках, на многоцелевых станках с ЧПУ, когда корпусную деталь обрабатывают с нескольких сторон с одной установки.

Наиболее полное использование принципа единства баз означает использование в качестве баз не только одних и тех же поверхностей, но также одних и тех же участков этих поверхностей.

С этой целью базирование деталей осуществляют по конструктив-

но оформленным опорным элементами, которые располагают на определенных участках базирующей поверхности.

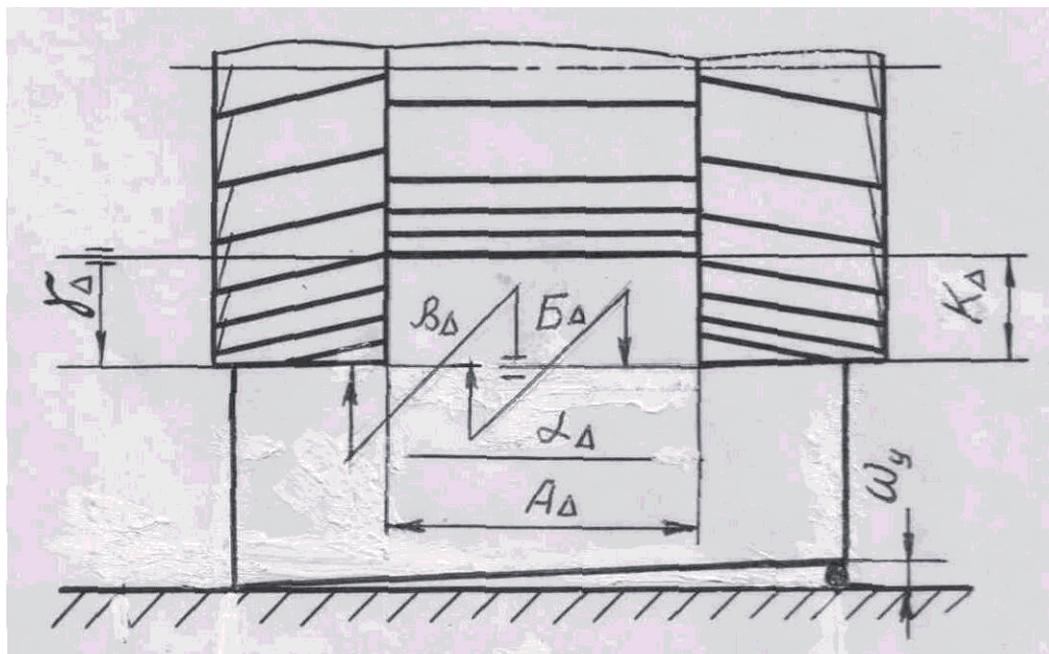


Рис. 3.13. Обработка нескольких поверхностей детали набором фрез с одной установки

Это положение эффективно используют для уменьшения влияния погрешности установки при базировании детали по одним и тем же, общим технологическим базам на различных станках, при выполнении нескольких операций.

### 3.5. Основы выбора технологических баз

Выбор технологических баз и определение последовательности обработки поверхностей является наиболее ответственным этапом разработки технологического процесса. Правильность принятия решения на этом этапе технологического проектирования во многом определяет достижение требуемой точности детали в процессе ее изготовления и экономичность технологического процесса.

Выбор технологических баз основан на анализе функционального назначения поверхностей детали и выявлении размерных связей, определяющих точность положения одних поверхностей детали относительно других [30].

Следует различать выбор технологических баз для обработки большинства поверхностей детали и выбор технологических баз на первой или на первых операциях, когда создаются базы для выполнения боль-

шинства операций технологического процесса. В первую очередь необходимо выбирать технологические базы для обработки большинства поверхностей детали, а затем базы для первой или первых двух-трех операций.

Для корпусных деталей характерным является наличие нескольких комплектов вспомогательных баз, образуемых сочетанием различных поверхностей, которые определенным образом связаны с основными базами детали и между собой. Анализ функционального назначения различных поверхностей детали и размерных связей между ними позволяет определить поверхности, относительно которых задано положение большинства других поверхностей, и выявить поверхности, к которым предъявляют наиболее жесткие технические требования, необходимость выполнения которых во многом определяет принимаемые решения.

Проведение такого анализа можно сделать наглядным путем построения схемы связей поверхностей детали. На рис. 3.14 показан пример построения схемы связей поверхностей для корпусной детали. Для этого поверхности детали обозначают индексами из определенных букв и цифр, определяющих функциональное назначение поверхности:

О – поверхности основных баз;

В – поверхности вспомогательных баз;

К – крепежных и резьбовых отверстий;

С – свободные поверхности детали, включая и необрабатываемые.

Поверхности основных баз, образуемые тремя базовыми поверхностями, нумеруют в порядке уменьшения числа располагаемых на них опорных точек. Например, О1 – установочная база; О2 – направляющая, или двойная опорная; О3 – опорная база (см. рис. 3.14, б). Для остальных поверхностей цифры обозначают последовательность их нумерации.

Схема связи поверхностей (рис. 3.14, в) строится в виде графа, в узлах которого располагают определенные поверхности детали, а на ребрах, соединяющих узлы, обозначают линейные и угловые размеры, связывающие эти поверхности.

Линейные размеры  $P_1, P_2, \dots, P_i$  наносят штриховыми линиями, а угловые  $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_p$  сплошными линиями со стрелкой, направленной

в сторону базы. На ребрах могут быть указаны также номиналы и допуски на соответствующие линейные и угловые размеры детали.

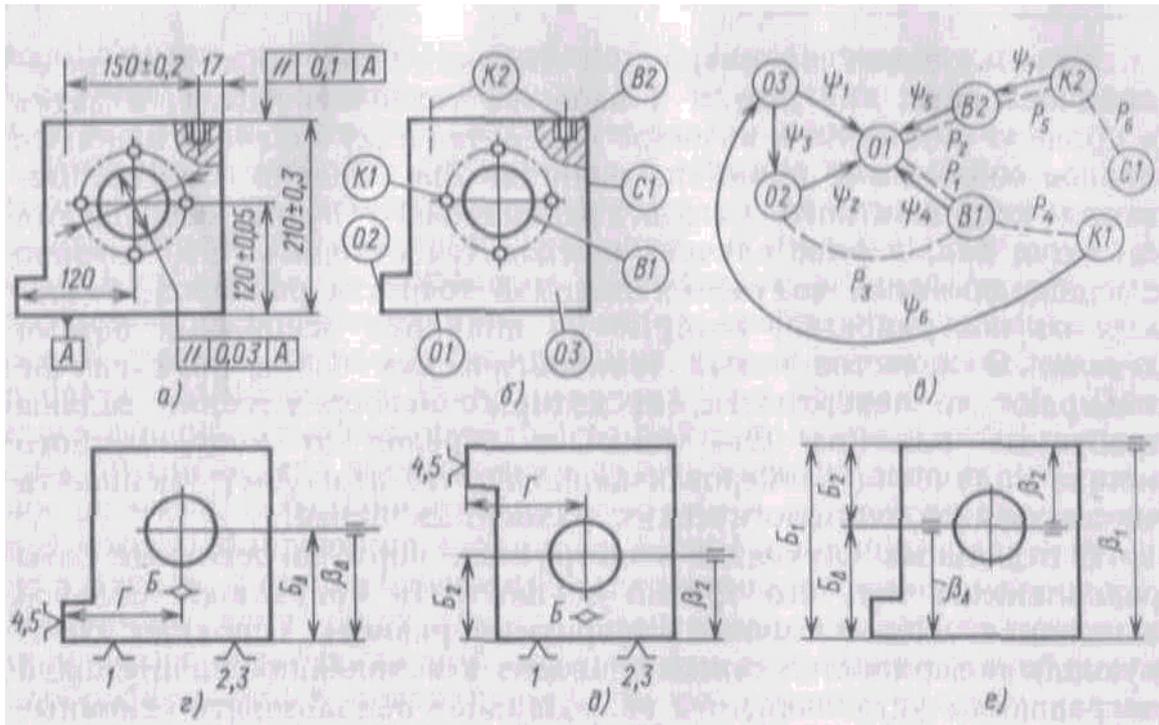


Рис. 3.14. Выбор технологических баз на основе построения схемы связи поверхностей корпусной детали: *а* – требования достижения точности корпуса; *б* – обозначение поверхностей деталей в соответствии с их функциональным назначением; *в* – схемы плоскостей, образующих координатный угол; *г* – схема связи поверхностей; *д* – схема базирования при обработке большинства поверхностей корпуса; *е* – технологические размерные цепи

Выбирая технологические базы, в первую очередь, следует исходить из необходимости достижения точности относительного поворота поверхностей детали, а затем точности расстояния. Это объясняется тем, что точность относительного поворота обеспечивается на станках методами взаимозаменяемости, что практически исключает возможность коррекции, а точность расстояния – методом регулировки, при котором возможна компенсация отклонений.

Анализ приведенных связей показывает, что положение главных отверстий и других обрабатываемых поверхностей определено угловыми и линейными размерами по отношению к основным базам корпуса. Это наглядно показывает направленность стрелок (угловых размеров) на поверхности O1, O2, O3 основных баз.

Для достижения требуемой точности детали наиболее коротким путем в качестве общих технологических баз на большинстве операций

следует выбирать поверхности детали, от которых задано положение большинства других поверхностей.

Так же, как и в данном примере, положение большинства поверхностей детали обычно задают относительно ее основных баз. В соответствии с этим в качестве технологических баз для обработки большинства поверхностей следует выбирать основные базы детали.

Для рассматриваемого корпуса в качестве общих технологических баз на большинстве операций выбраны плоскость основания  $O1$  и плоскости  $O2$ ,  $O3$ , образующие координатный угол (рис. 3.14, *з*).

Если при обработке отверстия в качестве установочной технологической базы взять противоположащую поверхность  $B2$  (рис. 3.14, *д*), то возникают более длинные технологические размерные цепи, представленные на рис. 3.14, *е*. Точность параметров, определяющих положение отверстия  $B1$  относительно плоскости  $O1$ , в этом случае будет зависеть от точности обработки на двух операциях – при обработке плоскости  $B2$  и при растачивании отверстия  $B1$ :

$$B_{\Delta} = B_1 - B_2; \beta_{\Delta} = \beta_1 - \beta_2.$$

В данном случае необходимость получения  $T_{B_{\Delta}} = 0,1$  мм,  $T_{\beta_{\Delta}} = 0,03/300$  станет возможной при условии уменьшения допуска на операционные размеры до значений

$$T_{B1} = 0,07 \text{ мм}; T_{B2} = 0,03 \text{ мм}; T_{\beta1} = T_{\beta2} = 0,015/300.$$

Это позволит обеспечить получение требуемой точности линейных и угловых размеров детали:

$$T_{B_{\Delta}} = T_{B1} + T_{B2} = 0,07 + 0,03 = 0,1 \text{ мм};$$

$$T_{\beta_{\Delta}} = T_{\beta1} + T_{\beta2} = 0,015/300 + 0,015/300 = 0,03/300.$$

Однако выполнить подобное ужесточение допусков на операционные размеры не всегда возможно. Поэтому необходимо стремиться к соблюдению принципа единства баз и наиболее ответственные параметры точности детали с жесткими допусками получать одним звеном как замыкающие звенья технологической системы соответствующего станка.

Обработка большинства поверхностей детали с общих технологических баз означает использование координатного метода получения точности размеров. Использование этого метода имеет особо важное значение для достижения требуемой точности относительных поворотов поверхностей детали. При координатном методе исключается влия-

ние погрешности установки детали на точность относительных поворотов поверхностей детали, обрабатываемых с одной установки.

Использование на операциях механической обработки основных баз детали в качестве технологических, а затем в процессе контроля в качестве измерительных означает наиболее полное соблюдение принципа единства баз.

Однако от использования координатного метода получения размеров в отдельных случаях приходится отказаться. Это связано с необходимостью получения высокой точности размеров, заданных от поверхностей, которые не являются основными базами детали. В качестве новых технологических баз в этом случае выбирают те поверхности, от которых непосредственно заданы требуемые размеры. Это означает переход к цепному методу получения размеров, что также позволяет уменьшить число звеньев технологической размерной цепи.

Решив задачу выбора баз для обработки большинства поверхностей детали, необходимо определить технологические базы для выполнения первой или первых операций технологического процесса. На первой или первых операциях обрабатывают поверхности, которые затем используют в качестве технологических баз на большинстве последующих операций технологического процесса.

При выборе технологических баз на первой операции следует исходить из необходимости решения двух задач [30]:

1. Установление требуемой точности относительного положения получаемых в результате обработки чистых поверхностей относительно черных, необрабатываемых поверхностей заготовки.

2. Достижение наиболее равномерного фактического припуска на обработку поверхностей детали и в первую очередь на обработку наиболее ответственных поверхностей.

Решение первой задачи по существу заключается в том, чтобы правильно вписать готовую деталь в контур полученной заготовки. Исходные данные для ее решения определяются техническими требованиями, вытекающими из служебного назначения детали.

Решение второй задачи определяется главным образом требованиями технологии. Требования достижения равномерного припуска возникают при обработке главных отверстий, когда применяют консольный инструмент сравнительно малой жесткости – сверла, зенкеры, расточные оправки, развертки. При обработке направляющих поверхностей

у станин, кареток, столов требование равномерного припуска обусловлено необходимостью съема одинакового по толщине слоя металла, что обеспечивает одинаковую поверхностную твердость и структуру металла по длине направляющих. В результате имеет место равномерный износ по длине направляющих, а следовательно и сохранение их геометрической точности в процессе работы. Для достижения этого на первой операции обрабатывают основание станины с базированием по направляющим, а затем обрабатывают направляющие с базированием по обработанному основанию.

Получение равномерного припуска на обрабатываемых поверхностях позволяет уменьшить число выполняемых проходов, переходов, а иногда и операций технологического процесса. При этом обработку можно выполнять на более высоких режимах резания. Все это обеспечивает повышение производительности, снижение себестоимости и имеет важное значение для повышения эффективности использования дорогостоящего станочного оборудования.

Определив в каждом конкретном случае задачи, стоящие при выборе технологических баз на первой операции, необходимо с учетом их важности установить определенный приоритет их решения. В большинстве случаев возможно несколько вариантов решения этих задач, и для нахождения предпочтительного решения необходимо проанализировать различные схемы базирования на первой операции. Это делают путем выявления и расчета возникающих технологических размерных цепей. Методика выявления и расчета технологических размерных цепей рассмотрена в § 4.1.

При изготовлении деталей сложной геометрической формы (тройников, вентилях, корпусов центробежных насосов и др.) обработку заготовок обычно выполняют с одной установки при базировании по черным поверхностям. Используемые в этом случае базовые поверхности образуют комплект единых технологических баз.

Выбор технологических баз на конкретных операциях при обработке определенных поверхностей следует выполнять исходя из требований достижения точности обработки на данной операции. Так, например, на рис. 3.15 представлен эскиз призматической детали с требованиями, определяющими размер и положение паза относительно плоских поверхностей. В соответствии с этим базирование детали при фрезеровании паза пальцевой фрезой на вертикально-фрезерном

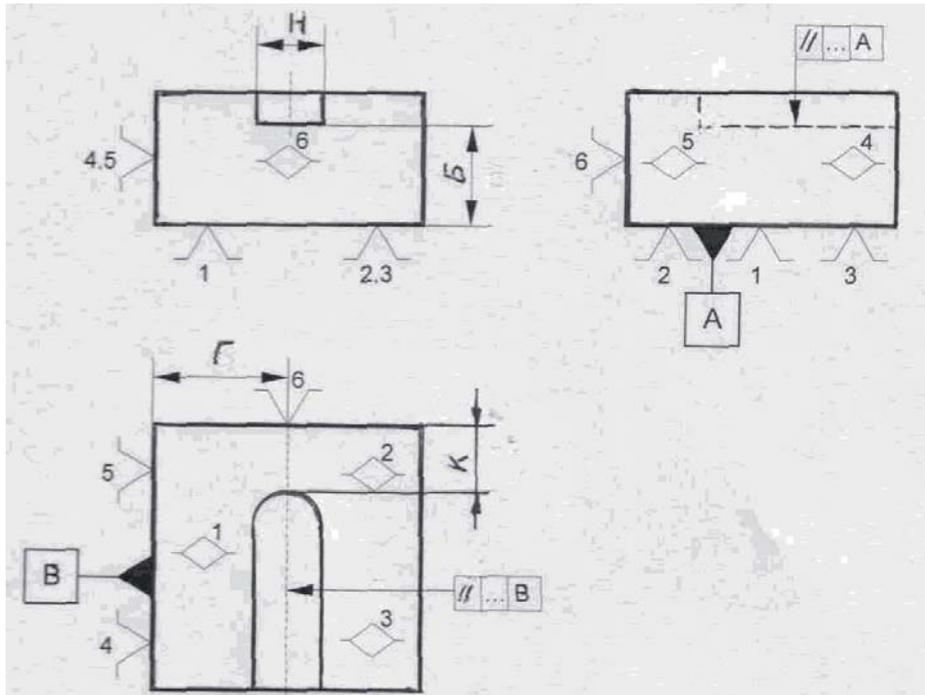


Рис. 3.15. Выбор технологических баз при фрезеровании паза в детали типа плитка

станке выполняют по трем плоскостям, от которых заданы требуемые параметры точности.

Установочной базой является плоскость А, имеющая наибольшую площадь, и относительно которой заданы параллельность паза и размер В.

Направляющей базой является плоскость В, имеющая наибольшую протяженность, и от которой заданы линейный размер Г и требование параллельности паза. Опорной базой является торец плитки, от которого задан линейный размер К.

На рис. 3.16 приведен второй пример детали типа диска с техническими требованиями на получение отверстия. В соответ-

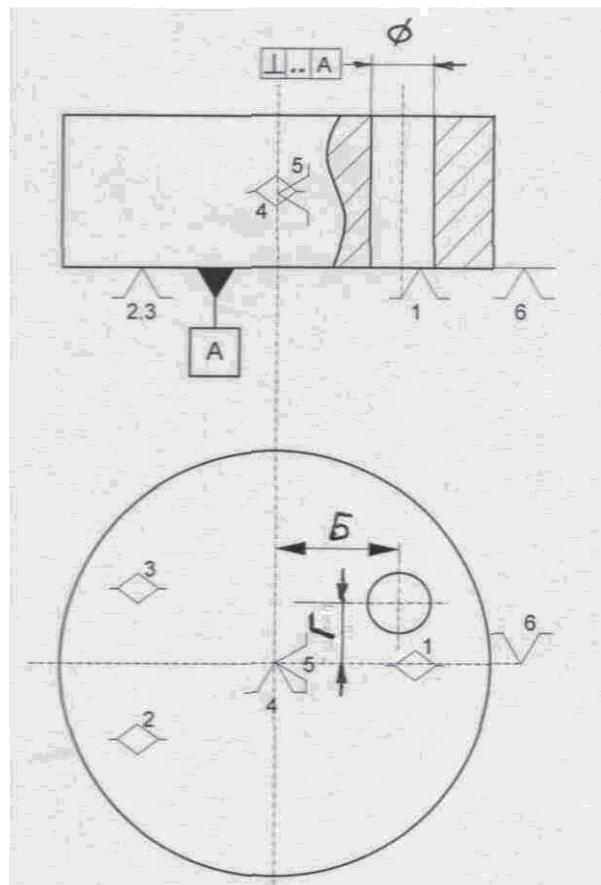


Рис. 3.16. Выбор технологических баз при сверлении отверстия в детали типа диска

ствии с заданными требованиями базирование детали при сверлении отверстия на вертикально-сверлильном станке выполняют с использованием двойной опорной базы. Установочной базой является плоскость А, перпендикулярно к которой должно располагаться отверстие, а двойной опорной базой является центр диска О, от которого размерами Б и Г заданы координаты центра получаемого отверстия. Эта схема базирования может быть реализована путем закрепления диска в самоцентрирующемся 3-кулачковом патроне или самоцентрирующихся тисках с призматическими губками.

### **Вопросы для самопроверки**

1. Что следует понимать под базированием деталей в машинах или заготовках при их обработке на станках?
2. Что такое конструкторские, технологические и измерительные базы?
3. Назовите три типовые схемы базирования деталей.
4. Какие базовые поверхности образуют схему базирования по трем плоскостям?
5. Какие базовые поверхности образуют схему базирования с использованием двойной опорной базы?
6. Какие базовые поверхности образуют схему базирования с использованием двойной направляющей базы?
7. Что следует понимать под скрытой базой?
8. В чем заключается правило шести точек?
9. Что означает принцип единства баз?
10. Что следует понимать под понятиями организованная и неорганизованная смена баз?
11. Назовите основные причины неорганизованной смены баз.
12. Какие поверхности детали следует выбирать в качестве общих технологических баз, используемых для базирования при обработке большинства поверхностей?
13. Сформулируйте две основные задачи, которые необходимо решать при выборе технологических баз на первой операции.

## Глава 4. РАЗМЕРНЫЕ СВЯЗИ В МАШИНАХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ

Между исполнительными поверхностями машин существуют различные виды связей, формирование которых обеспечивают кинематические и размерные связи, устанавливаемые в процессе сборки изделий.

Кинематические связи определяют точность относительного перемещения исполнительных поверхностей. В свою очередь, размерные связи определяют требуемую точность относительного положения исполнительных поверхностей.

### 4.1. Конструкторские, технологические и измерительные размерные цепи

Размерные связи делятся на два вида:

- 1) связи, определяющие точность расстояния;
- 2) связи, определяющие точность относительного поворота поверхностей.

Требуемая точность расстояний и относительных поворотов обеспечивается линейными и угловыми размерами деталей, которые связывают исполнительные поверхности машин. Размеры базовых деталей, связывающие исполнительные поверхности машин, образуют замкнутый контур соответствующей размерной цепи.

Совокупность размеров, расположенных по замкнутому контуру один за другим, называют *размерной цепью* [6].

На рис. 4.1 представлены схемы размерных цепей конической зубчатой передачи привода станка. Линейная размерная цепь  $A_{\Delta}$  (рис. 4.1, а) определяет совпадение вершин делительных конусов по горизонтали. Угловая размерная цепь  $\beta_{\Delta}$  (рис. 4.1, б) определяет точность угла скрещивания – перпендикулярность оси делительного конуса одного колеса относительно оси делительного конуса другого колеса. В каждой размерной цепи присутствует замыкающее (исходное) звено, которое обозначается определенной буквой с индексом “ $\Delta$ ”, как, например,  $A_{\Delta}$  и  $\beta_{\Delta}$ , и составляющие звенья.

Замыкающее (исходное) звено непосредственно определяет поставленную задачу. В расчетах это звено является исходным, а при сборке изделия становится замыкающим. Составляющие звенья определяют линейные или угловые размеры соответствующих деталей, которые участвуют в формировании точности замыкающего звена. Они обозна-

чаются определенной буквой и индексом “ $i$ ”, определяющим порядковый номер звена  $A_i, \beta_i$ . Звенья линейных размерных цепей обозначают заглавными буквами русского алфавита А, Б, В и др., а звенья угловых цепей – малыми буквами греческого алфавита  $\alpha, \beta, \gamma, \varphi$  и др.

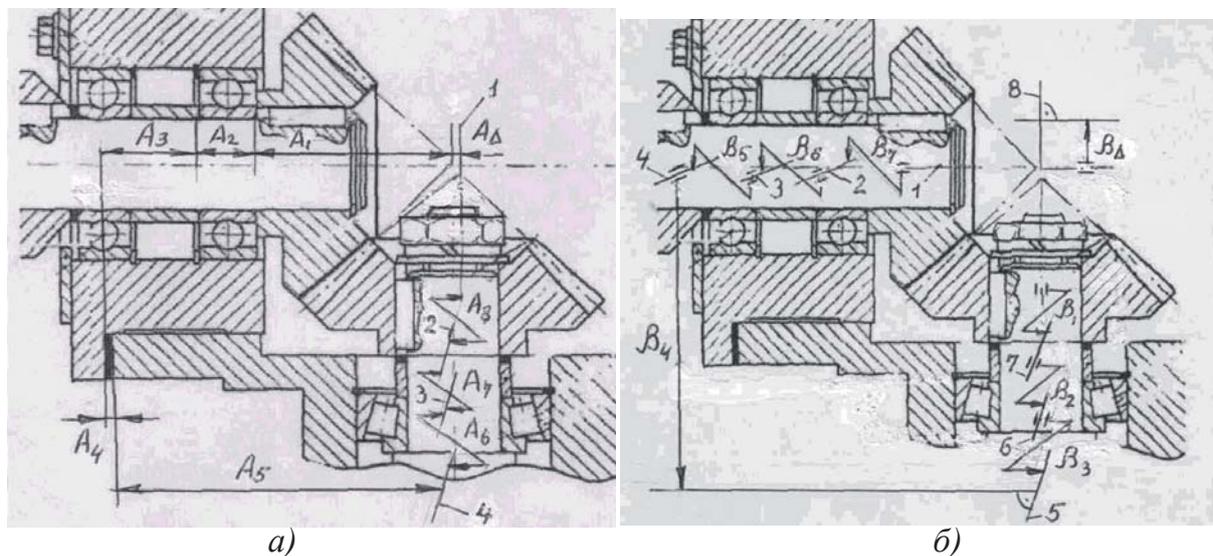


Рис. 4.1. Схемы размерных цепей конической зубчатой передачи привода станка: а – линейная размерная цепь  $A_{\Delta}$ , определяющая совпадение вершин делительных конусов по горизонтали (1 – ось делительного конуса; 2 – ось базового отверстия колеса; 3 – ось опорной ступени вала; 4 – ось отверстия в корпусе под подшипник); б – угловая размерная цепь  $\beta_{\Delta}$ , определяющая точность угла скрещивания осей делительных конусов двух конических колес (1 – ось делительного конуса; 2 – ось базового отверстия колеса; 3 – ось опорной ступени вала; 4 – ось отверстия в корпусе под подшипник; 5 – ось отверстия в корпусе под подшипник второго вала; 6 – ось опорной ступени второго вала; 7 – ось отверстия второго колеса; 8 – ось делительного конуса второго колеса)

С изменением величины составляющих звеньев происходит изменение величины замыкающего звена. Составляющее звено, с увеличением которого происходит увеличение замыкающего звена, называется *увеличивающим*. Для выделения таких звеньев их обозначают стрелкой, направленной слева направо:  $\vec{A}_4, \vec{A}_5$ .

Составляющее звено, с увеличением которого происходит уменьшение замыкающего звена, называется *уменьшающим*. Для выделения таких звеньев их обозначают стрелкой, направленной справа налево:  $\bar{A}_1, \bar{A}_2$ . В соответствии с этим уравнение размерной цепи, определяющее номинальное значение замыкающего звена, имеет вид

$$A_{\Delta} = \sum_{i=1}^{i=k} \vec{A}_i - \sum_{i=k+1}^{i=m-1} \bar{A}_i, \quad (4.1)$$

где  $\bar{A}_i$  – увеличивающие составляющие звенья цепи;  
 $\bar{A}_i$  – уменьшающие составляющие звенья цепи;  
 $m$  – общее число звеньев размерной цепи, включая замыкающее;  
 $k$  – число увеличивающих звеньев размерной цепи.

Звено, за счет изменения линейного или углового размеров которого устраняется излишняя, по сравнению с допустимым, погрешность замыкающего звена называется *компенсатором*. Для выделения таких звеньев их обводят квадратом, как, например,  $A_4$ . В зависимости от решаемых задач различают конструкторские, технологические и измерительные размерные цепи.

*Конструкторские* размерные цепи определяют размерные связи, формируемые в конструкциях машин. Так как положение деталей и узлов в машинах определяют их основные базы, а работают детали своими исполнительными поверхностями или вспомогательными базами, то составляющими звеньями конструкторских размерных цепей являются расстояния и повороты, которые определяют положение исполнительных поверхностей и вспомогательных баз относительно основных баз детали. Примером конструкторских размерных цепей являются размерные цепи конической зубчатой передачи, приведенные на рис. 4.1, уравнения которых имеют вид

$$A_{\Delta} = -A_1 - A_2 - A_3 + A_4 + A_5 + A_6 + A_7 + A_8;$$

$$\beta_{\Delta} = \beta_1 + \beta_2 + \beta_3 - \beta_4 - \beta_5 - \beta_6 - \beta_7.$$

Выявление конструкторской размерной цепи следует начинать с замыкающего звена, которое определяет решения определенной задачи, как, например, необходимость достижения определенного расстояния или относительного поворота между деталями изделия. Затем, начиная с ближайшей к замыкающему звену детали, следует последовательно выявлять все базовые детали, определяющие положение звеньев, ограничивающих замыкающее звено. На каждой из рассматриваемых базовых деталей следует выявлять составляющее звено, то есть необходимый размер в заданном направлении от вспомогательных баз (исполнительных поверхностей) детали до ее основных баз. Переходя таким образом от вспомогательных баз деталей к основным, следует замкнуть цепь с другой стороны соответствующим размером последней базовой детали.

Технологические размерные цепи бывают двух типов:

- 1) технологические размерные цепи станка;

2) технологические размерные цепи процесса.

Технологическая размерная цепь определенного станка определяет своим замыкающим звеном размер, получаемый на детали в результате ее обработки на данном станке. Составляющими звеньями такой цепи являются линейные и угловые размеры деталей станка, непосредственно участвующие в формировании точности обрабатываемой детали. На рис. 4.2 приведена технологическая размерная цепь универсально-фрезерного станка, определяющая размер детали  $B_{\Delta}$ , получаемый в результате фрезерования:

$$B_{\Delta} = -B_1 - B_2 - B_3 - B_4 - B_5 + B_6 + B_7 + B_8 + B_9 - B_{10}.$$

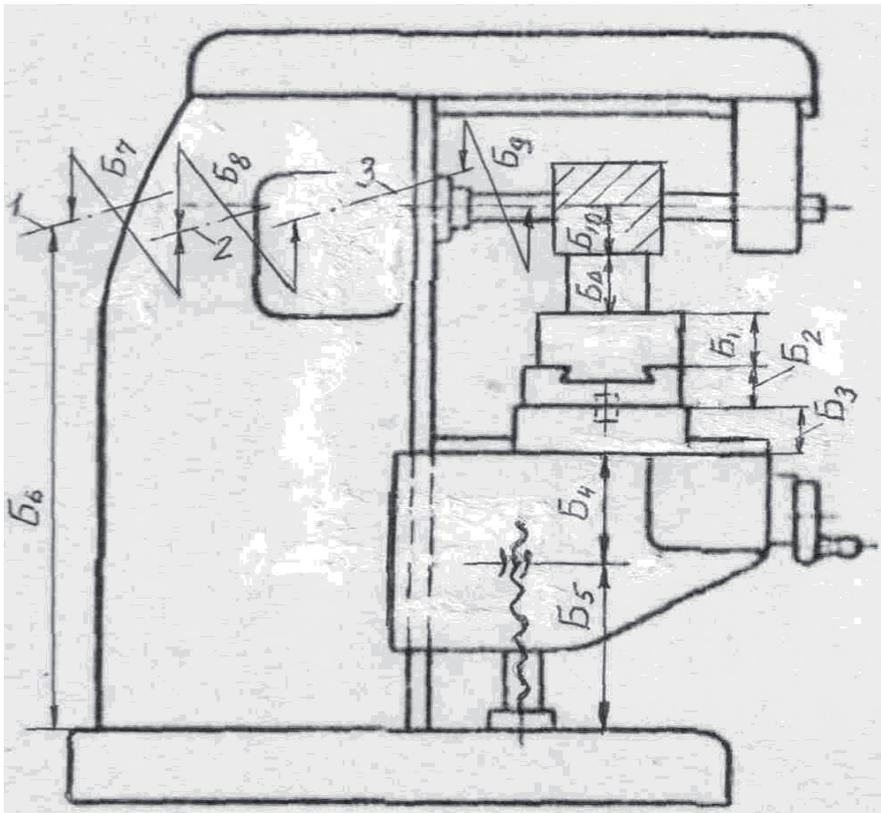


Рис. 4.2. Технологическая размерная цепь универсально-фрезерного станка: 1 – ось отверстия в станине; 2 – ось опорных шеек шпинделя; 3 – ось конического отверстия в шпинделе

Технологическая размерная цепь процесса определяет размерные связи, формируемые в результате выполнения ряда технологических операций по изготовлению данной детали. Замыкающим звеном такой цепи является размер или относительный поворот поверхностей, получаемые на детали в результате выполнения операций технологического процесса.

Составляющими звеньями таких цепей являются операционные и межпереходные размеры, а также припуски и размеры обрабатываемой заготовки. На рис. 4.3 представлены технологические размерные цепи процесса токарной обработки ступенчатого валика на автоматической линии. На первой операции, выполняемой на фрезерно-центровальном автомате, производится фрезерование торцов вала с обеих сторон и зацентровка базовых отверстий. В результате получают линейный размер  $A_1$ . На второй операции, выполняемой на токарном гидрокопировальном автомате, производят точение вала с одной стороны. Вал базируется в центрах с упором в левый торец, от которого получается линейный размер  $A_2$ . Затем вал поворачивают для точения с другой стороны. В результате на третьей операции получают линейный размер  $A_3$ . Линейные операционные размеры получены на станках прямым путем от соответствующих технологических баз. Однако линейный размер ступени, имеющей наибольший диаметр, не получается прямым путем. Он определяется как замыкающее звено  $A_\Delta$  технологической размерной цепи, составляющими звеньями которой являются операционные размеры, полученные на предшествующих операциях (рис. 4.3, з):

$$A_\Delta = -A_1 + A_2 - A_3.$$

Поэтому точность этого размера  $\omega_\Delta$  зависит от точности, достигаемой на предшествующих технологических операциях:

$$\omega_\Delta = \omega_1 + \omega_2 + \omega_3.$$

Выявлять размерные цепи технологического процесса следует начинать с замыкающего (исходного) звена. Путем анализа технологического процесса выявляют операцию, на которой формируется замыкающее звено, а затем, рассматривая предшествующие операции, выявляют составляющие звенья цепи, то есть соответствующие операционные размеры. При этом следует идти от последней из обработанных поверхностей, ограничивающей замыкающее звено, до технологической базы, от которой она получена. Затем аналогично выявляют операционный размер, определяющий получение технологической базы, и так далее до замыкания цепи с другой стороны. Если подобный анализ (обход) приводит к поверхности заготовки, то дальнейшее построение цепи выполняется размерами заготовки. Цепи номеруются в соответствии с последовательностью их получения. Первыми номерами определяют размеры заготовки, а затем – номера операционных и межпереходных размеров в соответствии с последовательностью выполнения технологических операций.

*Измерительные* размерные цепи определяют размерные связи, фор-

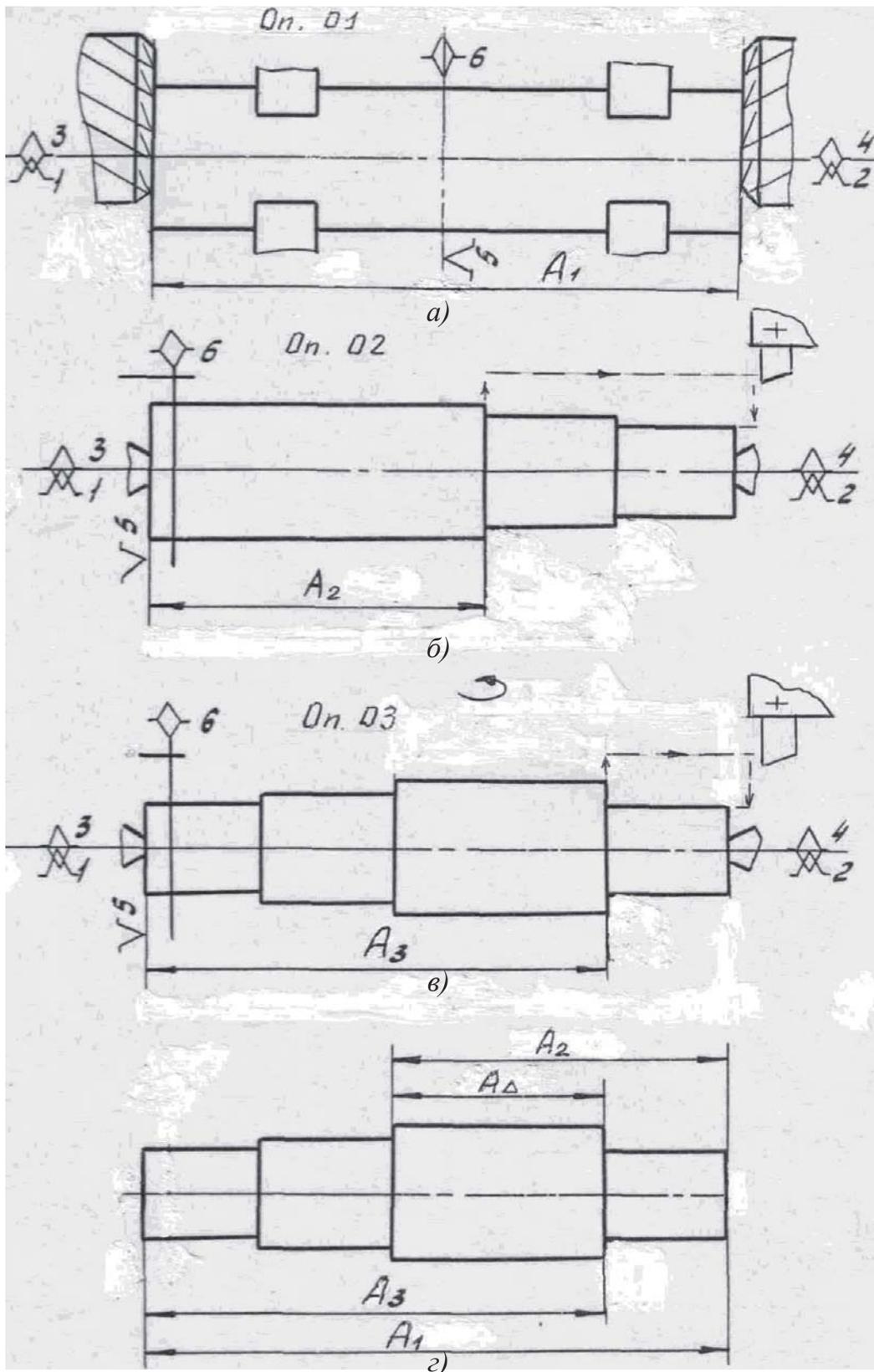


Рис. 4.3. Технологические размерные связи процесса токарной обработки ступенчатого вала: а, б, в – технологические операции; г – размерная цепь

мируемые в процессе контроля параметров точности деталей и узлов машин. Замыкающим звеном измерительной цепи являются контролируемый параметр точности, а составляющими звеньями являются линейные или угловые размеры деталей измерительного прибора. На рис. 4.4 представлена измерительная размерная цепь  $V_{\Delta}$ , формируемая при контроле диаметрального размера валика с помощью микрометра:

$$V_{\Delta} = -V_1 + V_2 + V_3 - V_4.$$

В зависимости от пространственного расположения звеньев различают плоские и пространственные размерные цепи.

Размерная цепь, звенья которой параллельны и расположены в одной или параллельных плоскостях, называется *плоской*.

Размерная цепь, у которой хотя бы одно звено не отвечает требованиям плоской цепи, называется *пространственной*. Расчет пространственной размерной цепи (рис. 4.5) выполняют путем приведения ее к трем плоским цепям  $A_{\Delta x}$ ,  $A_{\Delta y}$ ,  $A_{\Delta z}$ . С этой целью все звенья пространственной размерной цепи проектируют на три координатные плоскости:

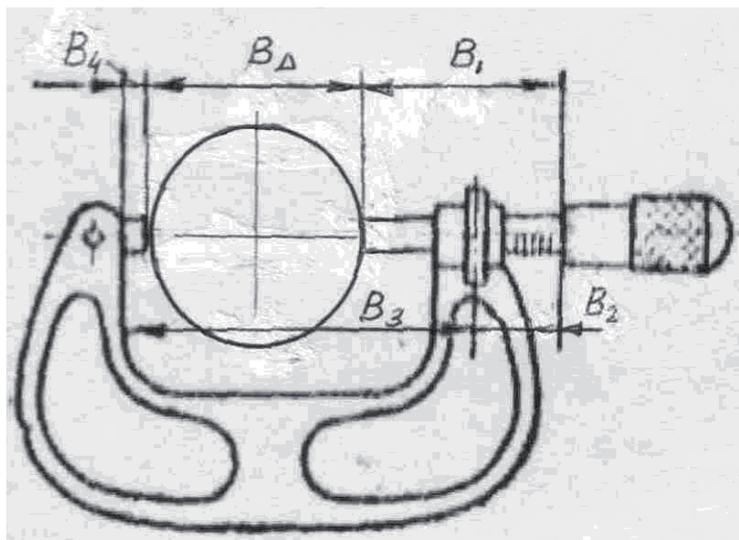


Рис. 4.4. Измерительная размерная цепь

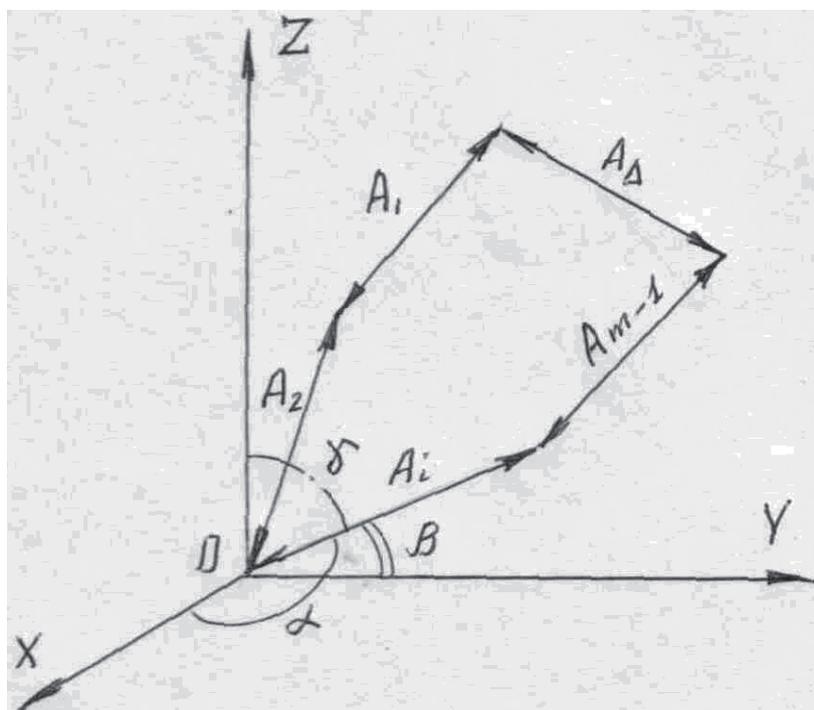


Рис. 4.5. Схема пространственной размерной цепи

$$A_{ix} = A_i \cos \alpha_i; A_{iy} = A_i \cos \beta_i; A_{iz} = A_i \cos \gamma_i$$

где  $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$  – углы между соответствующим звеном  $A_i$  и координатными осями  $X, Y, Z$ .

Замыкающие звенья в каждой из трех плоских цепей  $A_{\Delta x}, A_{\Delta y}, A_{\Delta z}$  рассчитывают согласно (4.1):

$$A_{\Delta x} = \sum_{i=1}^{i=m-1} A_{ix}; A_{\Delta y} = \sum_{i=1}^{i=m-1} A_{iy}; A_{\Delta z} = \sum_{i=1}^{i=m-1} A_{iz}.$$

Замыкающее звено пространственной размерной цепи определяют по формуле

$$A_{\Delta} = \sqrt{A_{\Delta x}^2 + A_{\Delta y}^2 + A_{\Delta z}^2}. \quad (4.2)$$

## 4.2. Погрешность замыкающего звена размерной цепи

Погрешность на замыкающем звене размерной цепи возникает в результате отклонений, формируемых на составляющих звеньях рассматриваемой цепи. При этом следует различать два варианта определения погрешности:

1) определение погрешности на замыкающем звене размерной цепи для одного изделия;

2) определение погрешности на замыкающем звене размерной цепи для партии изделий.

В первом случае имеет место одна реализация размерной цепи, при которой на каждом из составляющих звеньев возникает одно определенное отклонение  $\Delta_i$ , что наглядно показано на рис. 4.6, а. В результате на замыкающем звене формируется отклонение  $\Delta_{\Delta}$ , величина которого определяется как алгебраическая сумма отклонений  $\Delta_i$  составляющих звеньев с учетом их знака и характера звена:

$$\Delta_{\Delta} = \sum_{i=1}^{i=k} \bar{\Delta}_i - \sum_{i=k+1}^{i=m-1} \bar{\Delta}_i,$$

где  $\bar{\Delta}_i, \bar{\Delta}_i$  – отклонения соответственно увеличивающего и уменьшающего звеньев.

Для трехзвенной размерной цепи  $A_{\Delta}$ , приведенной на рис. 4.6, а, имеем:

$$\Delta_{\Delta} = \bar{\Delta}_1 - \bar{\Delta}_2,$$

и при  $\Delta_1 = 0,2$  мм,  $\Delta_2 = -0,2$  мм отклонение на замыкающем звене составит

$$\Delta_{\Delta} = 0,2 - (-0,1) = 0,3 \text{ мм}.$$

Во втором случае, когда рассматривается погрешность замыкающего звена для партии изделий  $\omega_{\Delta}$ , имеет место многократная реализация размерной цепи. При этом отклонения  $\Delta_i$  на составляющих звеньях могут изменяться в пределах от верхнего  $\Delta_i^B$  до нижнего  $\Delta_i^H$  допу-

скаемых предельных значений, а погрешность составляющего звена  $\omega_i$  представляет собой поле рассеяния  $\omega_i$ , которое определяется как разность (рис. 4.6, б):

$$\omega_i = \Delta_i^B - \Delta_i^H$$

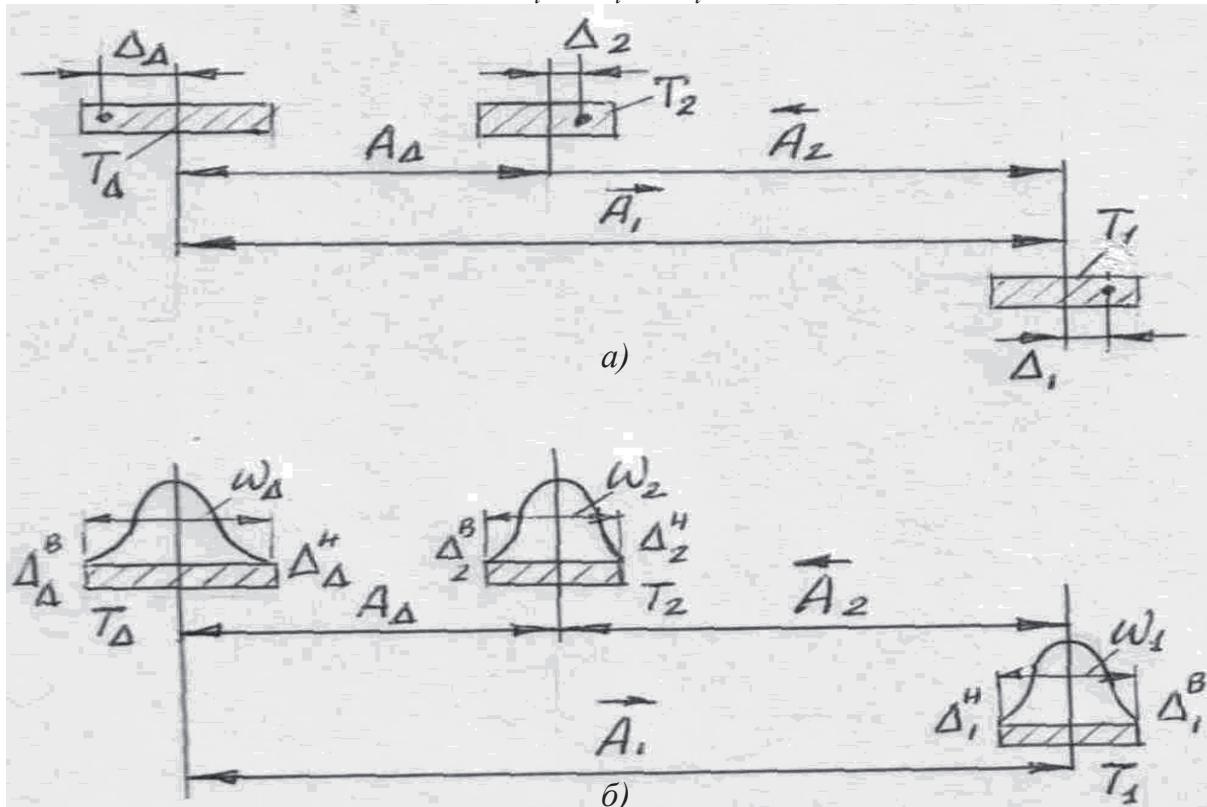


Рис. 4.6. Схема формирования погрешности на замыкающем звене размерной цепи: а – для одного изделия; б – для партии изделий

В результате, на замыкающем звене формирование отклонений может происходить в пределах от верхнего  $\Delta_\Delta^B$  до нижнего  $\Delta_\Delta^H$  значений и для рассматриваемого примера (см. рис. 4.6, б) это можно записать:

$$\Delta_\Delta^B = \Delta_1^B - \Delta_2^H \text{ и } \Delta_\Delta^H = \Delta_1^H - \Delta_2^B.$$

Погрешность замыкающего звена  $\omega_\Delta$  также представляет собой поле рассеяния, величина которого определяется как разность:

$$\omega_\Delta = \Delta_\Delta^B - \Delta_\Delta^H = (\Delta_1^B - \Delta_1^H) + (\Delta_2^B - \Delta_2^H),$$

что означает:  $\omega_\Delta = \omega_1 + \omega_2$ .

Таким образом, погрешность замыкающего звена для партии изделий представляет собой поле рассеяния  $\omega_\Delta$ , величина которого рассчитывается как арифметическая сумма полей рассеяния отклонений  $\omega_i$ , формируемых на составляющих звеньях:

$$\omega_\Delta = \sum_{i=1}^{i=m-1} \omega_i, \quad (4.3)$$

где  $m$  – число звеньев размерной цепи.

В общем случае, при учете возможности различного влияния каждого из составляющих звеньев, выражение (4.3) принимает вид

$$\omega_{\Delta} = \sum_{i=1}^{i=m-1} \xi_i \cdot \omega_i, \quad (4.4)$$

где  $\xi_i$  – передаточное отношение составляющего звена.

Передаточные отношения  $\xi_i$  определяют степень влияния отклонения каждого из составляющих звеньев на точность замыкающего звена, они представляют собой частные производные (коэффициенты приведения):

$$\xi_1 = \frac{\partial A_1}{\partial A_{\Delta}}; \xi_2 = \frac{\partial A_{21}}{\partial A_{\Delta}}; \xi_{m-1} = \frac{\partial A_{m-1}}{\partial A_{\Delta}}.$$

Для плоских размерных цепей с параллельными звеньями  $|\xi_i| = 1$ .

Для рассматриваемой в качестве примера (рис. 4.6, б) трехзвенной размерной цепи  $A_{\Delta}$  поля рассеяния  $\omega_i$  на составляющих звеньях при  $\Delta_1^B = 0,3$ ,  $\Delta_1^H = -0,1$  и  $\Delta_2^B = 0,15$ ,  $\Delta_2^H = -0,15$  составляют

$$\omega_1 = 0,3 - (-0,1) = 0,4; \omega_2 = 0,15 - (-0,15) = 0,3.$$

В соответствии с этим, согласно (4.3), погрешность замыкающего звена размерной цепи для партии изделий составит:  $\omega_{\Delta} = 0,4 + 0,3 = 0,7$  мм.

### 4.3. Изменения параметров качества изделий и их оценка

В процессе выполнения технологических операций имеет место действие большого количества различных факторов, которые определяются состоянием станка, режущего инструмента, входными параметрами заготовки, действиями рабочего и многим другим. Эти факторы обычно непрерывно изменяются, в результате чего меняются и достигаемые параметры качества изделий, параметры точности изготавливаемых деталей. Поэтому изделия, полученные при выполнении одного и того же технологического процесса, отличаются одно от другого и от своих номинальных параметров, заданных в чертежах. Это явление называется рассеянием характеристик качества изделий.

Отклонения получаемых параметров качества изделия следует рассматривать как непрерывные или дискретные случайные величины, для описания которых используют методы теории вероятности и математической статистики [21].

В качестве примера на рис. 4.7 показана точечная диаграмма изме-

нения диаметрального размера валиков, обработанных на токарном полуавтомате. Точечная диаграмма наглядно показывает, что, несмотря на казалось бы неизменные условия обработки всех валиков данной партии, диаметральные размеры валиков получаются различными. Величина поля рассеяния размеров в данном случае составляет  $\omega = 0,20$  мм.

Построение точечной диаграммы выполняется следующим образом: по оси абсцисс откладываются порядковые номера деталей в последовательности их обработки на станке, а по оси ординат откладываются величины получаемого параметра точности.

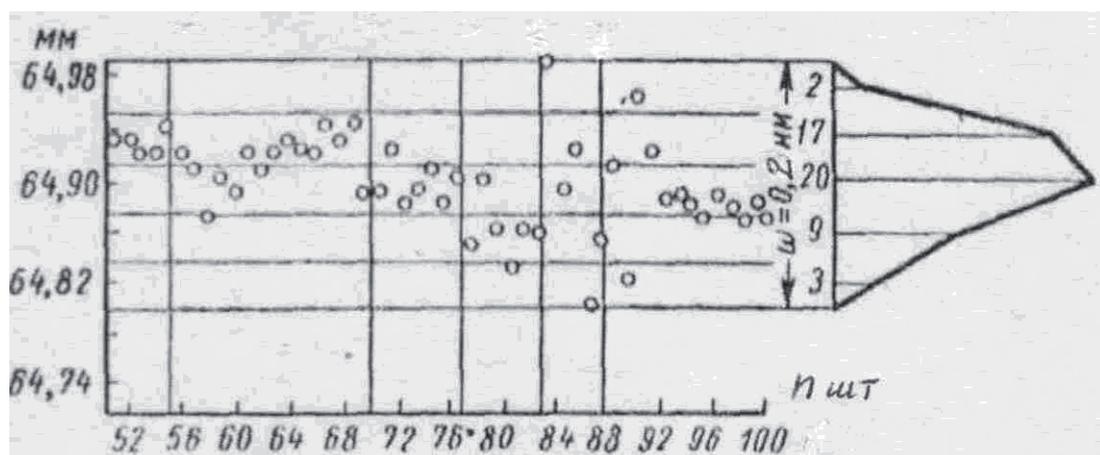


Рис. 4.7. Точечная диаграмма изменения диаметрального размера валиков

Подобным образом можно построить точечную диаграмму для различных параметров качества изделия – для отклонений относительных поворотов, отклонений припуска, отклонений твердости поверхностного слоя и др. При этом рассеяние любого параметра качества изделия характеризуется, прежде всего, величиной поля рассеяния  $\omega$ , которое определяется как разность между наибольшим  $A^{нб}$  и наименьшим  $A^{нм}$  значениями данного параметра:

$$\omega = A^{нб} - A^{нм}.$$

В пределах поля рассеяния случайная величина может принимать различные значения, появление которых характеризует вероятностное описание случайной величины. Соотношение, устанавливающее связь между возможными значениями случайной величины и соответствующими вероятностями их появления, называется *законом распределения случайной величины*.

Закон распределения может быть задан в различной форме. Простейшей формой задания закона распределения является таблица, в которой перечислены в порядке возрастания все возможные значения

дискретной случайной величины и соответствующие им вероятности, например:

$x_1$	$x_2$	...	$x_n$
$p_1$	$p_2$	...	$p_n$

Такую таблицу называют рядом распределения. Графическое изображение ряда распределения называют полигоном распределения, или кривой рассеяния случайной величины. Пример построения кривой рассеяния для диаметральных размеров пятидесяти одного валика показан на рис. 4.7. С этой целью поле рассеяния  $\omega = 65,00 - 64,80 = 0,20$  мм разделено на пять равных интервалов линиями, параллельными оси абсцисс. В каждом из интервалов подсчитывают количество валиков, попавших в данный интервал размеров, и откладывают вдоль оси абсцисс координату соответствующей длины.

Если общее число измеренных величин равно  $n$ , а значение  $x_i$  имеет  $m$  величин, попавших в определенный интервал, то частота значения  $x_i$  определяется выражением

$$P(x_i) = m/n.$$

Частота может быть определена как в долевом, так и в процентном выражении.

Для рассматриваемого примера диаметра валиков в количестве  $n = 51$  шт. табличное отображение закона распределения имеет вид

Параметры	Интервалы размеров, мм				
	64,80 – 64,84	64,84 – 64,88	64,88 – 64,92	64,92 – 64,96	64,96 – 65,00
Количество валиков $m$	3	9	20	17	2
Частота $P(x_i), \%$	5,9	17,6	39,2	33,4	3,9

После соединения нанесенных на график концов соответствующих отрезков получают ломаную линию распределения вероятностей дискретной случайной величины (рис. 4.7).

Если количество величин измеренного параметра, попавших в каждый из интервалов, представить в виде прямоугольников, ширина которых равна величине интервала, а высота равна частоте  $P(x_i)$ , то получится ступенчатая диаграмма, носящая название гистограммы рассеяния.

Общей формой закона распределения как для дискретных, так и для непрерывных случайных величин является задание функции рас-

пределения. Функцию распределения можно задать в виде интегрального закона распределения (функция распределения) и в виде дифференциального закона распределения (плотность вероятности).

Функцией распределения случайной величины  $X$  называют вероятность выполнения неравенства  $X < x$ :

$$F(x) = P(X < x),$$

где  $x$  – неслучайный аргумент.

Функция распределения  $F(x)$  должна быть неубывающей функцией своего аргумента, то есть  $F(-\infty) = 0$  и  $F(+\infty) = 1$ . На рис. 4.8 приведены графики функции распределения  $F(x)$  для дискретной (4.8, а) и непрерывной (4.8, б) случайных величин.

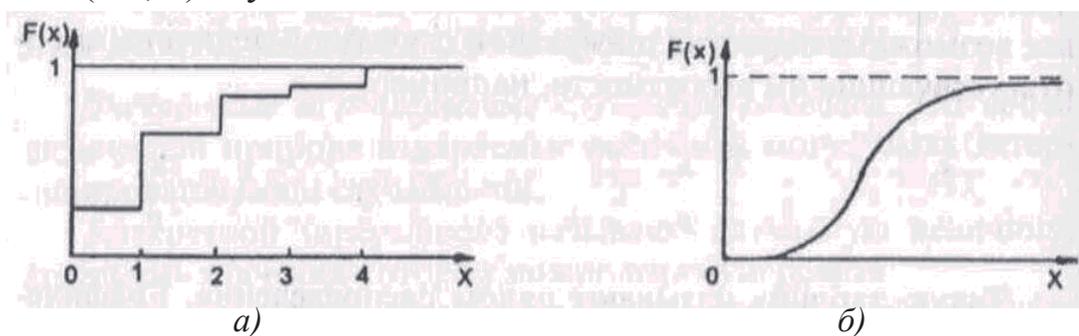


Рис. 4.8. Графики функции распределения  $F(x)$  случайных величин: а – дискретной; б – непрерывной

Плотностью вероятности непрерывной случайной величины называют производную функцию распределения:

$$\varphi(x) = F'(x) = \lim [F(x + \Delta x) - F(x)] / \Delta x.$$

Плотность вероятности  $\varphi(x)$  обладает следующими свойствами:

$$\varphi(x) > 0 \text{ – неотрицательна; } \int_{-\infty}^{+\infty} \varphi(x) dx = 1.$$

График плотности вероятности  $\varphi(x)$  непрерывной случайной величины представлен на рис. 4.9. Функция распределения  $F(x)$  выражается через плотность вероятности  $\varphi(x)$  формулой

$$F(x) = \int_{-\infty}^x \varphi(x) dx$$

Функция распределения  $F(x)$ , как и вероятность, есть величина безразмерная, а плотность вероятности имеет размерность, обратную размерности случайной величины.

Вероятность попадания непрерывной случайной величины на заданный интервал  $(a, b)$  определяется выражением

$$P(a < X < b) = F(b) - F(a) = \int_a^b \varphi(x) dx$$

Геометрически эта вероятность равна площади криволинейной трапеции, ограниченной кривой распределения, осью абсцисс и прямыми  $x = a$  и  $x = b$  (см. рис. 4.9).

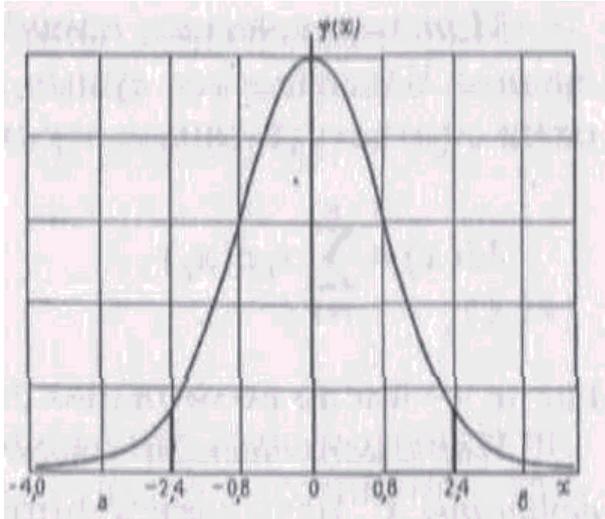


Рис. 4.9. График плотности вероятности  $\varphi(x)$  непрерывной случайной величины

является суммой произведений возможных значений случайной величины на соответствующие вероятности:

$$M(x) = \sum_{i=1}^n x_i p(x_i),$$

где  $n$  – число возможных значений случайной величины.

Математическим ожиданием  $M(x)$  непрерывной случайной величины  $x$  является определенный интеграл от произведения плотности вероятности  $\varphi(x)$  на действительное переменное  $x$ , взятый в пределах от  $-\infty$  до  $+\infty$ :

$$M(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} x \varphi(x) dx.$$

К характеристикам рассеяния случайной величины относятся дисперсия и среднеквадратическое отклонение. Дисперсией  $D(x)$  дискретной случайной величины называется сумма квадратов отклонений случайной величины  $x$  от ее математического ожидания  $M(x)$ , умноженная на соответствующие вероятности:

$$D(x) = \sum_{i=1}^n (x_i - M(x))^2 p(x_i).$$

Для непрерывной случайной величины дисперсия определяется по формуле

$$D(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} (x - M(x))^2 \varphi(x) dx.$$

Среднеквадратическим отклонением случайной величины называют положительное значение квадратного корня из дисперсии:

$$\sigma(x) = \sigma_x = \sqrt{D(x)};$$

для дискретных величин:

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^m [x_i - M(x)]^2 p(x)};$$

для непрерывных величин:

$$\sigma = \sqrt{\int_{-\infty}^{+\infty} [x_i - M(x)]^2 \varphi(x) dx}.$$

Среднеквадратичное отклонение измеряется в тех же единицах, что и сама величина  $x$  и ее среднее значение, тогда как дисперсия выражается в квадратах соответствующей единицы измерения.

В качестве самой приближенной меры точности исследуемого процесса обработки может служить поле рассеяния  $\omega$ . Величину поля рассеяния  $\omega$  можно определить по графику или по таблице измерения исследуемых параметров. Чем уже поле рассеяния, тем точнее исследуемый параметр.

Из теории вероятностей известно, что если рассеяние какого-либо параметра зависит от совокупного влияния ряда случайных факторов одного порядка, которые не зависят или слабо зависят один от другого,

то рассеяние рассматриваемого параметра следует закону нормального распределения, закону Гаусса (рис. 4.10), для которого плотность

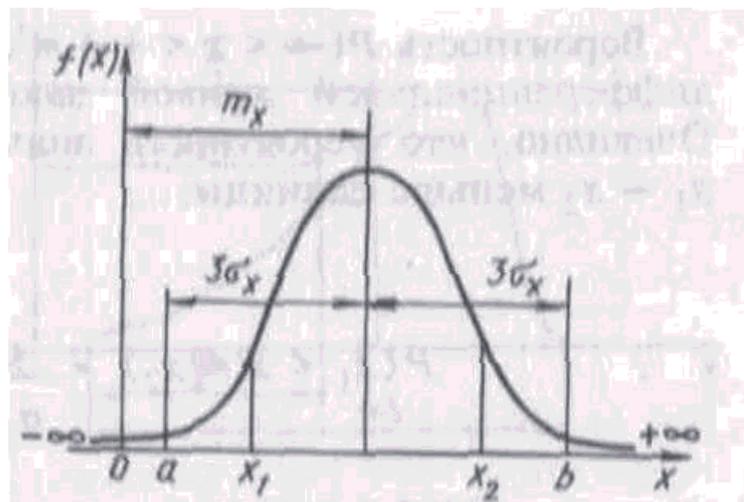


Рис. 4.10. Дифференциальный закон нормального распределения случайной величины

вероятности или дифференциальная функция распределения имеет вид:

$$\varphi(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-m_x)^2}{2\sigma^2}},$$

где  $x$  – переменная случайная величина;

$\varphi(x)$  – плотность вероятности;

$\sigma$  – среднее квадратичное отклонение случайной величины  $x$  от  $m_x$ ;

$m_x$  – математическое ожидание случайной величины;

$e$  – основание натуральных алгоритмов  $e = 2,71828$ ;  $\pi = 3,14$ .

Кривая нормального распределения симметрична относительно ординаты, соответствующей среднему значению отклонений  $m_x$ , и асимптотически приближается по обе стороны к оси абсцисс. Положение кривой относительно начала отсчета и ее форма определяются двумя параметрами:  $m_x$  и  $\sigma$  (рис. 4.11). С изменением  $m_x$ , например  $\bar{X}_1$  и  $\bar{X}_2$  (см. рис. 4.11, а) форма кривой не изменяется, но происходит ее смещение вдоль оси абсцисс. С изменением  $\sigma$  положение кривой не изменяется, однако происходит изменение ее формы. При увеличении  $\sigma$  кривая становится более полой и ее ветви раздвигаются по оси абсцисс (см. рис. 4.11, б). В свою очередь, с уменьшением  $\sigma$  кривая становится более крутой и ее ветви сближаются.

Интегральный закон нормального распределения определяется выражением

$$F(x) = \int_{-\infty}^x \varphi(x) dx = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{(x-m_x)^2}{2\sigma^2}} dx.$$

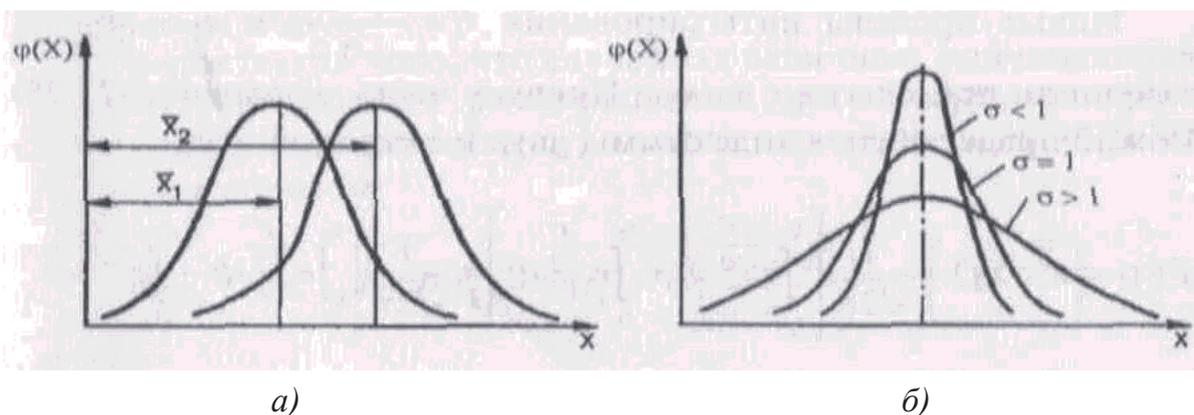


Рис. 4.11. Влияние параметров  $m_x$  и  $\sigma$  на положение и форму кривой нормального распределения

Если случайная величина, следуя нормальному закону рассеяния, принимает любые численные значения в пределах  $(-\infty < x < +\infty)$ , то

имеет место вероятность  $P(-\infty < x < +\infty) = 1$ , которую определяет площадь под дифференциальной кривой нормального распределения.

Вероятность значения  $x$  в любом другом интервале  $(x_1, x_2)$  (см. рис. 4.10) меньше 1 и будет равна

$$P(x_1 \leq x \leq x_2) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{x_1}^{x_2} e^{-\frac{(x-m_x)^2}{2\sigma^2}} dx .$$

Для упрощения вычислений выполняют замену переменных  $x$  на  $t$  с помощью нормируемого множителя  $t = (x - m_x) / \sigma$  и получают:

$$P(x_1 \leq x \leq x_2) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{t_1}^{t_2} e^{-\frac{t^2}{2}} dt .$$

Интеграл  $\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{t_1}^{t_2} e^{-\frac{t^2}{2}} dt = \Phi(t)$  называется нормированной функцией Лапласа, его значения для различных  $t = (x - m_x) / \sigma$  приводятся в таблицах значений функции Лапласа. В соответствии с этим вероятность того, что случайная величина находится в пределах  $(x_1, x_2)$ , определяют как разность двух значений функции Лапласа:

$$P(x_1 \leq x \leq x_2) = \Phi(t_2) - \Phi(t_1) = \Phi\left(\frac{x_2 - m_x}{\sigma}\right) - \Phi\left(\frac{x_1 - m_x}{\sigma}\right) .$$

Вероятность того, что случайная величина  $x$  находится в пределах отклонений  $(x_1 = m_x - 3\sigma; x_2 = m_x + 3\sigma)$ , близка к единице и составляет  $P = 0,9973$ , а вероятность появления случайной величины за пределами указанных отклонений равна  $q = 1 - P = 1 - 0,9973 = 0,0027$ . Поэтому практически поле рассеяния случайной величины при нормальном законе распределения ограничивается величинами  $x = \pm 3\sigma$  и составляет  $\omega = 6\sigma$ .

В этом случае 99,73 % отклонений случайной величины попадают в область внутри установленных пределов  $x = \pm 3\sigma$  и только 0,27 % выходят за установленные пределы.

### ***Виды погрешностей***

Погрешности, возникающие при механической обработке, можно разделить на два вида: *систематические и случайные*. Систематические погрешности подразделяются на постоянно действующие и систематические, изменяющиеся по определенному закону.

*Постоянные систематические погрешности* – погрешности, которые в течение всего времени обработки сохраняют свое значение. Систематические постоянные погрешности не изменяются при обработке

одной или нескольких партий заготовок. Они возникают под влиянием постоянно действующего фактора.

Примером подобных погрешностей могут служить, например, отклонение от перпендикулярности оси просверленного отверстия к базовой плоскости заготовки из-за отклонения от перпендикулярности оси шпинделя к плоскости стола вертикально-сверлильного станка; ошибки межосевого расстояния растачиваемых отверстий из-за неправильно выдержанного расстояния между осями направляющих втулок расточного кондуктора; погрешность формы обтачиваемой поверхности (конусность) в результате отклонения от параллельности оси шпинделя направляющим станины токарного станка и т.п.

Систематически действующие погрешности, изменяющиеся по определенному закону, в процессе обработки вызывают возрастание или убывание соответствующих параметров точности. Примером таких погрешностей являются отклонения размеров деталей, вызываемые размерным износом и затуплением режущего инструмента.

Систематические погрешности по характеру своего действия могут проявляться и как *периодические*, значение которых определяется периодической функцией времени. Примером периодически действующей погрешности может служить погрешность, возникающая в результате температурной деформации станка в период его пуска до достижения состояния теплового равновесия.

Выявление законов изменения систематических погрешностей позволяет принимать определенные меры для их устранения или компенсации при выполнении технологических операций. Систематическая составляющая погрешности может быть выявлена средствами статистического анализа.

*Случайные погрешности* обычно возникают в результате действия большого количества несвязанных между собой факторов. Случайная погрешность по величине может иметь различное значение; определить заранее момент появления и величину этой погрешности для конкретной детали не представляется возможным.

Примерами случайных погрешностей являются погрешность установки заготовки на станке, погрешности обработки, вызываемые упругими перемещениями элементов технологической системы под действием переменных сил резания, а также колебания входных параметров заготовки – припуска, поверхностной твердости и др.

Причинная связь между случайной погрешностью и факторами,

вызывающими ее появление, иногда бывает известной, а в ряде случаев и не вполне выясненной.

На рис. 4.12 в качестве примера представлены точечные диаграммы диаметральных размеров валиков, обработанных на токарном гидрокопировальном полуавтомате. Под действием таких факторов, как колебания припуска, твердости заготовок, на различных ступенях валика возникают случайные погрешности, определяющие формирование мгновенных полей рассеяния диаметральных размеров  $\omega_{ТI}$ ;  $\omega_{ТII}$ ; ...  $\omega_{ТVI}$ . После обработки валика № 11 произошла замена резца новым резцом. Размерная настройка нового резца отличалась от предыдущего, что определило внесение в настройку станка постоянной погрешности, в результате чего диаметральные размеры валика за № 11 на I, II и III-ей ступенях вышли за пределы полей допусков.

В результате поднастройки, выполненной перед точением валика № 13, в размерную настройку технологической системы была внесена определенная коррекция, что означает действие постоянного фактора.

Вследствие этого поле рассеяния, порождаемое действием случайных факторов, было смещено к нижнему пределу поля допуска. Это позволило получить требуемую точность диаметральных размеров на всех трех ступенях валика. Действие постоянного фактора после выполнения размерной поднастройки при точении IV, V и VI-й ступеней валика наглядно видно и на других точечных диаграммах, приведенных на рис. 4.12.

Следует отметить, что систематические постоянно действующие факторы, как правило, остаются такими только на период определен-

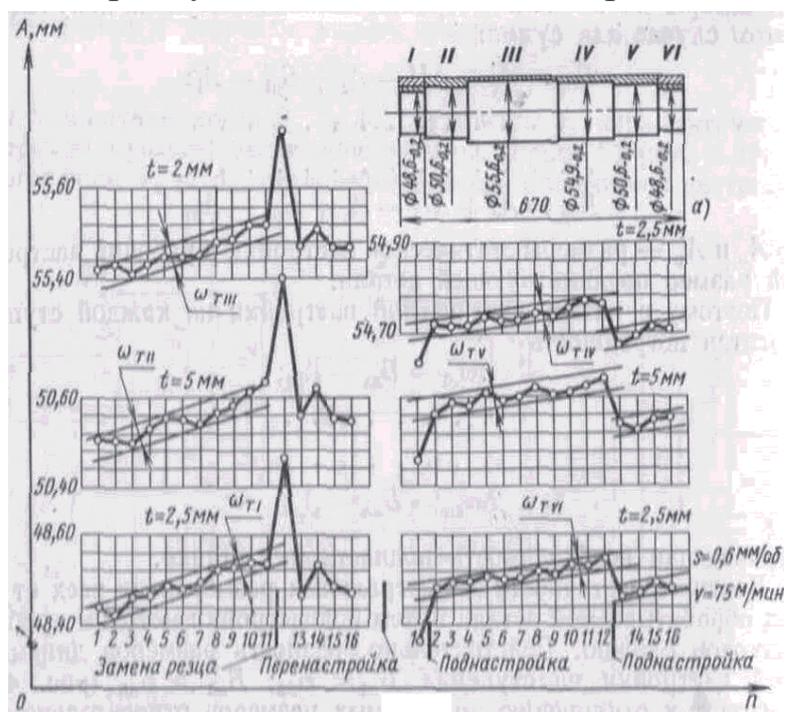


Рис. 4.12. Точечные диаграммы диаметральных размеров валиков, обработанных на токарном гидрокопировальном полуавтомате

ных промежутков времени, продолжительность которых бывает различна. Например, погрешность настройки резца как систематический постоянно действующий фактор сохраняется только до момента выполнения поднастройки станка или до момента замены затупившегося резца новым.

Таким образом, при выполнении технологических процессов имеет место явление рассеяния характеристик качества изготавливаемых изделий, порождаемое совокупным действием систематических и случайно действующих факторов. В результате действия большого количества независимых или слабо зависимых случайных факторов величин одного порядка происходит формирование рассеяния, приближающееся к теоретическому закону нормального рассеяния, к закону Гаусса. По такому закону обычно формируется мгновенное поле рассеяния размеров. Возникновение одного или нескольких доминирующих факторов вносит соответствующие изменения в величину поля рассеяния и его характер. Кривые рассеяния в этих случаях формируются как композиции ряда кривых, порождаемых действием случайных и доминирующих систематически действующих факторов.

На рис. 4.13 представлена точечная диаграмма, показывающая совокупное влияние действия случайных факторов, определяющих фор-

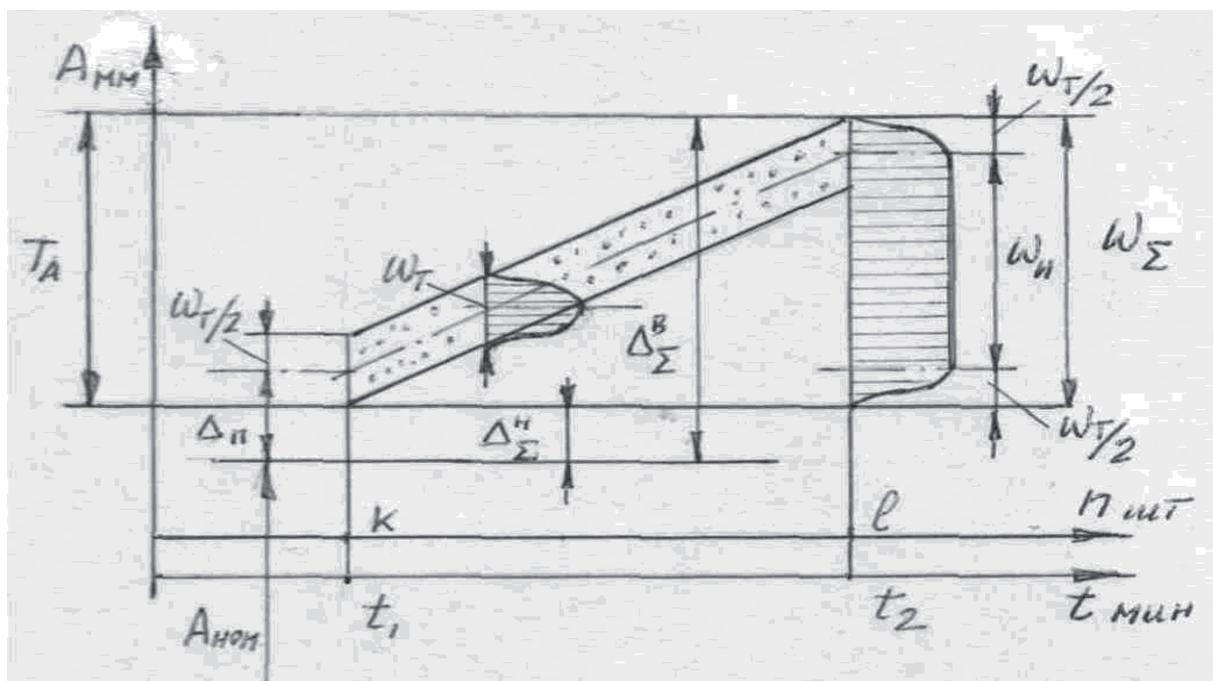


Рис. 4.13. Схема совокупного влияния действия случайных и систематического факторов

мирование мгновенного поля рассеяния  $\omega_t$  размеров шлифуемых колец, и одного систематически действующего фактора, порождаемого

размерным износом шлифовального круга. Под действием систематического фактора происходит смещение центра группирования мгновенного поля рассеяния. Теоретическая кривая рассеяния в этом случае имеет форму отрезка прямой линии, параллельной оси ординат, по которой откладываются величины размеров. Теоретический закон такого рассеяния носит название *закона равной вероятности*. В результате кривая рассеяния размеров деталей формируется как композиции закона нормального рассеяния и закона равной вероятности, а общее поле рассеяния  $\omega_{\Sigma}$  представляет сумму

$$\omega_{\Sigma} = 0,5\omega_{\tau} + \omega_{и} + 0,5\omega_{\tau},$$

где  $\omega_{и}$  – часть поля рассеяния, обусловленная действием систематического фактора, определяемого законом равной вероятности.

Анализ точечных диаграмм показывает, что отклонение  $\Delta_{\Sigma}$  получаемой характеристики качества изделия, например отклонение размера детали от номинала, в каждый момент формируется путем алгебраического или векторного суммирования отклонений, порождаемых действием всех факторов:

$$\Delta_{\Sigma} = \Delta_{п} + \Delta_{и} + \Delta_{\tau},$$

где  $\Delta_{п}$  – отклонения, порождаемые действием постоянных факторов;

$\Delta_{и}$  – отклонения, порождаемые действием систематических факторов, изменяющихся по определенному закону;

$\Delta_{\tau}$  – отклонения, обусловленные совокупным действием случайных факторов.

Наибольшая величина отклонения  $\Delta_{\Sigma}^B$  наблюдаемого параметра качества изделия за определенный промежуток времени  $(t_1; t_2)$ , когда выполнена обработка партии деталей от  $k$  до детали  $l$ , определяется путем суммирования:

$$\Delta_{\Sigma}^B = \Delta_{п}(t_1) + \omega_{и}(t_2) + 0,5\omega_{\tau}(t_2),$$

где  $\Delta_{п}(t_1)$  – погрешность, обусловленная действием систематических постоянных факторов на момент  $t_1$  начала наблюдения;

$\omega_{и}(t_2)$  – погрешность, обусловленная действием систематических изменяющихся факторов на момент  $t_2$  окончания наблюдения;

$\omega_{\tau}(t_2)$  – мгновенное поле рассеяния, порождаемое совокупным действием случайных факторов на момент  $t_2$  окончания наблюдения.

В свою очередь, наименьшая величина отклонения  $\Delta_{\Sigma}^H$  наблюдаемого параметра качества изделия за промежуток времени  $(t_1; t_2)$  обработки партии деталей можно рассчитать:

$$\Delta_{\Sigma}^H = \Delta_{п}(t_1) + \omega_{и}(t_1) - 0,5\omega_{\tau}(t_1),$$

где  $\omega_n(t_2)$  – погрешность, обусловленная действием систематических изменяющихся факторов на момент  $t_1$  начала наблюдения;

$\omega_r(t_1)$  – мгновенное поле рассеяния, порождаемое совокупным действием случайных факторов на момент  $t_1$  начала наблюдения.

Схема явления рассеяния одного из параметров качества для партии изделий (например для заготовок, деталей или сборочных единиц) представлена на рис. 4.14. Величина поля рассеяния  $\omega$  параметра качества и кривая рассеяния обусловлены совокупным действием случайных факторов. Положение поля рассеяния относительно номинального значения  $A_{ном}$  параметра качества определяется координатой  $\Delta_\omega$  середины поля рассеяния. В свою очередь, величину среднего значения отклонений определяет координата  $M(x)$  центра группирования отклонений. Смещение центра группирования отклонений обусловлено совокупным влиянием систематических факторов.

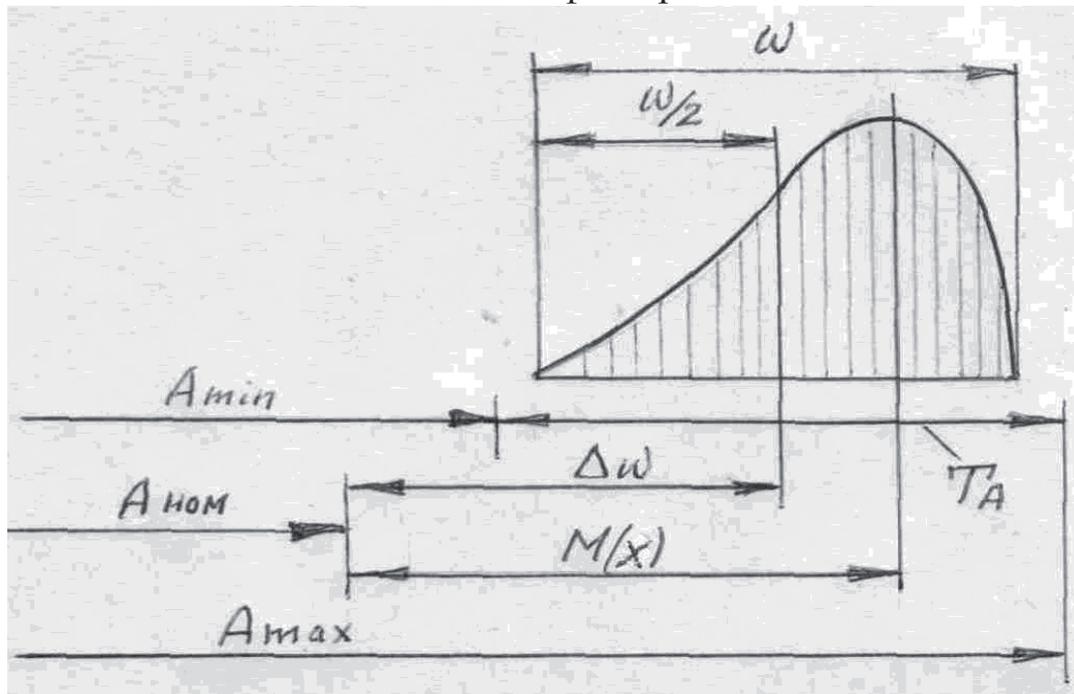


Рис. 4.14. Схема явления рассеяния одного из параметров качества для партии изделий

Для характеристики асимметричности рассеяния отклонений и смещения центра их группирования относительно координаты середины поля рассеяния используют коэффициент относительной асимметрии  $\alpha$ :

$$\alpha = \frac{M(x) - \Delta_\omega}{\omega/2}.$$

Использование коэффициента относительной асимметрии  $\alpha$  позволяет рассчитать координату центра группирования отклонений:

$$M(x) = \Delta_{\omega} + \alpha\omega/2$$

и определить среднее значение рассматриваемого параметра качества:

$$A_{\text{ср}} = A_{\text{ном}} + M(x).$$

#### 4.4. Пять методов достижения точности замыкающего звена размерной цепи

Обеспечение точности создаваемых машин и их узлов означает достижение требуемой точности замыкающих звеньев размерных цепей формируемых в конструкции изделия. При этом каждое замыкающее звено в общем случае представляет определенное техническое требование, вытекающее из служебного назначения изготавливаемого изделия. Правильный выбор метода достижения точности замыкающего звена и назначение экономически обоснованных допусков на составляющие звенья, на размеры деталей изделия является одним из основных факторов, определяющих достижение требуемого качества изделия с наименьшими производственными затратами.

##### *Расчет размерной цепи в номиналах. Решение прямой и обратной задач*

Расчет размерной цепи включает расчет номинальных значений составляющих звеньев ( $A_{\Delta}, A_1, \dots, A_{m-1}$ ) и расчет допусков ( $T_{\Delta}, T_1, \dots, T_{m-1}$ ) на все звенья цепи. При этом следует различать решение прямой и обратной задач. Решение прямой задачи означает определение требуемой точности составляющих звеньев  $A_i, T_i$  исходя из заданной точности замыкающего звена  $A_{\Delta}, T_{\Delta}$ :

$$(A_{\Delta}, T_{\Delta}) \Rightarrow (A_1, T_1, \dots, A_i, T_i, \dots, A_{m-1}, T_{m-1}).$$

Решение обратной задачи означает определение точности замыкающего звена при заданной точности составляющих звеньев:

$$(A_1, T_1, \dots, A_i, T_i, \dots, A_{m-1}, T_{m-1}) \Rightarrow (A_{\Delta}, T_{\Delta}).$$

Расчет любой размерной цепи выполняют в два этапа:

1. На первом этапе рассчитывают размерную цепь в номиналах. Расчет выполняют согласно уравнению размерной цепи (4.1), которое в общем случае имеет вид

$$A_{\Delta} = \sum_{i=1}^{i=k} \vec{A}_i - \sum_{i=k+1}^{i=m-1} \vec{A}_i.$$

2. На втором этапе выполняют расчет размерной цепи в допусках. Расчет выполняют с учетом выбираемого метода достижения точности замыкающего звена. Для достижения требуемой точности замыкающего звена при сборке изделий и при изготовлении деталей применяют

пять методов достижения точности: 1 – метод полной взаимозаменяемости, 2 – метод неполной (частичной) взаимозаменяемости, 3 – метод групповой взаимозаменяемости, 4 – метод регулировки и 5 – метод пригонки. Рассмотрим расчеты размерных цепей в допусках при использовании всех пяти методов достижения точности.

### ***Достижение точности методом полной взаимозаменяемости***

*Сущность метода полной взаимозаменяемости заключается в том, что требуемая точность замыкающего звена размерной цепи достигается путем включения в размерную цепь составляющих звеньев без какого-либо выбора, подбора или изменения их величин.*

В качестве примеров применения этого метода можно привести:

1. Применение взаимозаменяемых унифицированных деталей и узлов в автомобилях, в числе которых взаимозаменяемые корпусные детали двигателя и ходовой части, детали шатунно-поршневой группы, взаимозаменяемые вкладыши в подшипниках скольжения и др.

2. Взаимозаменяемость деталей стандартных резьбовых соединений – винтов, болтов, гаек, шпилек, шайб.

3. Взаимозаменяемость стандартных подшипников качения и электродвигателей одной марки.

4. Взаимозаменяемость деталей и приборов бытовой техники, включая электролампы, электрические розетки, вилки и др.

Примером применения метода полной взаимозаменяемости при механообработке является замена затупившихся сверл, зенкеров, разверток, метчиков на сверлильных, расточных и токарно-револьверных станках.

Согласно методу полной взаимозаменяемости допуск на замыкающем звене  $T_{\Delta}$  должен быть равен сумме допусков  $T_i$  составляющих звеньев:

$$T_{\Delta} = \sum_{i=1}^{m-1} T_i, \quad (4.5)$$

где  $m$  – число звеньев размерной цепи.

При решении прямой задачи расчет по этому методу, начинают с определения среднего допуска на составляющие звенья:

$$(4.6)$$

Ориентируясь на полученное значение среднего допуска  $T_{cp}$ , назначают допуски на все составляющие звенья, учитывая при этом сложность изготовления каждой детали. При этом назначают не только

допуски на составляющие звенья  $T_i$ , но и допускаемые предельные отклонения  $(\Delta_i^B, \Delta_i^H)$ :

$$(T_1, \Delta_1^B, \Delta_1^H), (T_2, \Delta_2^B, \Delta_2^H) \dots (T_i, \Delta_i^B, \Delta_i^H) \dots (T_{m-1}, \Delta_{m-1}^B, \Delta_{m-1}^H).$$

Затем определяют правильность назначения допусков.

Однако этого не достаточно. Допуск на замыкающем звене может быть по-разному расположен относительно номинала. Поэтому необходимо рассчитать получаемые на замыкающем звене предельные отклонения  $\Delta_\Delta^B, \Delta_\Delta^H$ , то есть необходимо проверить правильность назначения предельных отклонений  $(\Delta_i^B, \Delta_i^H)$  на составляющих звеньях. Для этого используют следующие формулы:

$$\Delta_\Delta^B = \sum_{i=1}^{i=k} \bar{\Delta}_i^B - \sum_{i=k+1}^{i=m-1} \bar{\Delta}_i^H; \quad (4.7)$$

$$\Delta_\Delta^H = \sum_{i=1}^{i=k} \bar{\Delta}_i^H - \sum_{i=k+1}^{i=m-1} \bar{\Delta}_i^B. \quad (4.8)$$

При расчете точности с использованием координат середин полей допусков  $\Delta_{0i}$  для проверки определяют координату середины поля допуска замыкающего звена  $\Delta_{0\Delta}$ . Она рассчитывается как алгебраическая сумма координат середин полей допусков увеличивающих и уменьшающих звеньев:

$$\Delta_{0\Delta} = \sum_{i=1}^{i=k} \bar{\Delta}_{0i} - \sum_{i=k+1}^{i=m-1} \bar{\Delta}_{0i}, \quad (4.9)$$

где  $\bar{\Delta}_{0i}, \bar{\Delta}_{0i}$  – координаты середин полей допусков увеличивающих и уменьшающих звеньев.

Затем по формулам (4.10), (4.11) рассчитывают получаемые предельные отклонения на замыкающем звене и сравнивают их с требуемыми значениями:

$$\Delta_\Delta^B = \Delta_{0\Delta} + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{i=m-1} T_i, \quad (4.10)$$

$$\Delta_\Delta^H = \Delta_{0\Delta} - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{i=m-1} T_i, \quad (4.11)$$

*Преимущества метода полной взаимозаменяемости:*

1. Простота реализации технологического процесса сборки изделия. Сборка осуществляется путем простого соединения деталей без подбора или пригонки, что не требует использования рабочих высокой квалификации.

2. Широкие возможности для кооперации машиностроительных предприятий и цехов при изготовлении различных деталей и узлов.

3. Широкие возможности применения унифицированных и стандартизированных деталей и узлов, изготавливаемых в больших количествах с меньшей себестоимостью.

4. Простота организации и нормирования производства.

5. Стабильность качества и высокая надежность изготавливаемых изделий.

*Недостаток метода:* необходимость соблюдения малых (жестких) допусков на составляющие звенья в многозвенных цепях. Это значительно удорожает изготовление изделий и ограничивает применение метода в многозвенных цепях.

Метод полной взаимозаменяемости целесообразно использовать для достижения высокой точности в малозвенных размерных цепях. Его применение особенно эффективно в условиях поточного производства при больших программах выпуска. При широком допуске на замыкающем звене этот метод можно эффективно применять и в многозвенных цепях.

*Пример.* Ниже будет рассмотрен сквозной пример применения различных методов достижения точности для получения требуемого зазора у одного изделия.

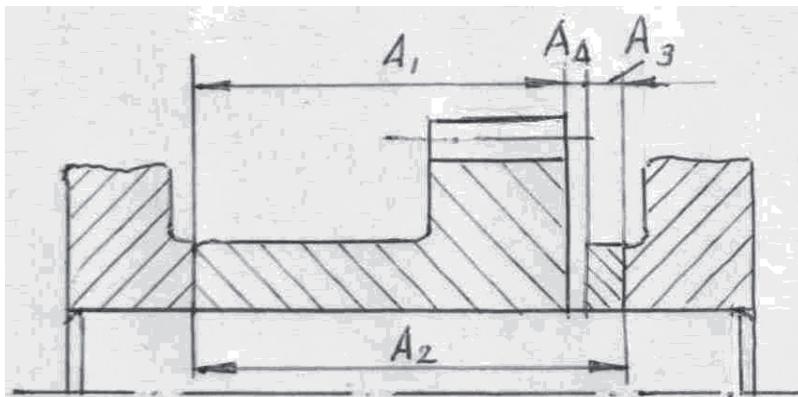


Рис. 4.15. Схема размерной цепи, определяющей зазор  $A_{\Delta}$  между стенкой корпуса и шестерней

зазора  $A_{\Delta} = 0$ , верхнее предельное отклонение  $\Delta_{\Delta}^B = 0,2$ , нижнее предельное отклонение  $\Delta_{\Delta}^H = 0$ , допуск на зазор равен

$$T_{A_{\Delta}} = \Delta_{\Delta}^B - \Delta_{\Delta}^H = 0,2 - 0 = 0,2 \text{ мм.}$$

В свою очередь, координата середины поля допуска  $\Delta_{0\Delta}$  составляет

$$\Delta_{0\Delta} = (\Delta_{\Delta}^B + \Delta_{\Delta}^H) / 2 = (0,2 - 0) / 2 = 0,1 \text{ мм.}$$

В первую очередь, выявляем размерную цепь, определяющую требуемый зазор:

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

*Задача:* обеспечить требуемую величину зазора  $A_{\Delta}$  между корпусом и шестерней (рис. 4.15). Согласно техническим требованиям зазор  $A_{\Delta}$  должен быть в пределах от 0 до 0,2 мм. Это означает, что номинальное значение

а затем согласно полученному уравнению выполняем расчет размерной цепи в номиналах. Номинальные размеры составляющих звеньев определяем по чертежам деталей, участвующих в формировании цепи:

$A_{\Delta}$	$\bar{A}_1$	$\bar{A}_2$	$\bar{A}_3$
0	50	55	5

Подставив в уравнения численные значения звеньев, получаем требуемый номинальный размер замыкающего звена:

$$A_{\Delta} = -50 + 55 - 5 = 0.$$

Следовательно, расчет показывает, что номинальные размеры звеньев цепи, проставленные в чертежах деталей, определены правильно.

Далее выполняем расчет размерной цепи в допусках с учетом выбираемого метода достижения точности.

*Метод полной взаимозаменяемости:*

Рассчитываемый средний допуск  $T_{cp}$  по формуле (4.6)

$$T_{cp} = \frac{T_{\Delta}}{m-1} = \frac{0,2}{4-1} = 0,066.$$

Ориентируясь на полученный  $T_{cp}$ , назначаем допуски и предельные отклонения на составляющие звенья с учетом сложности изготовления деталей:

	$\bar{A}_1$	$\bar{A}_2$	$\bar{A}_3$
$T_{Ai}$	0,03	0,15	0,02
$\Delta_{i}^B$	0	0,15	?
$\Delta_{i}^H$	-0,03	0	?
$\Delta_{0i}$	-0,015	0,075	?

Правильность назначения допусков проверяют по формуле (4.5)

$$T_{\Delta} = \sum_{i=1}^{4-1} Ti = 0,03 + 0,15 + 0,02 = 0,2 \text{ мм.}$$

Назначим предельные отклонения и координаты средин полей допусков для звеньев  $A_1$  и  $A_2$ , а предельные отклонения  $\Delta_3^B$ ,  $\Delta_3^H$  и координату  $\Delta_{03}$  для третьего звена определим, используя формулы (4.7), (4.8), (4.9):

$$\Delta_{\Delta}^B = \Delta_2^B - (\Delta_1^H + \Delta_3^H); \quad 0,2 = 0,15 - (-0,03 + \Delta_3^H);$$

$$\Delta_{\Delta}^H = \Delta_2^H - (\Delta_1^B + \Delta_3^B); \quad 0 = 0 - (0 + \Delta_3^B).$$

В результате получим  $\Delta_3^B = 0$ ,  $\Delta_3^H = 0,02$ ,  $\Delta_{03} = -0,01$ .

Проверку правильности назначения допусков и предельных отклонений выполняем по формулам (4.10), (4.11):

$$\Delta_{\Delta}^B = \bar{\Delta}_{02} - (\bar{\Delta}_{01} + \bar{\Delta}_{03}) + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{4-1} T_i; \quad \Delta_{\Delta}^H = \bar{\Delta}_{02} - (\bar{\Delta}_{01} + \bar{\Delta}_{03}) - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{4-1} T_i$$

$$\Delta_{\Delta}^B = 0,075 - (-0,015 - 0,01) + 0,5 \cdot (0,03 + 0,15 + 0,02) = 0,2;$$

$$\Delta_{\Delta}^H = 0,075 - (-0,015 - 0,01) - 0,5 \cdot (0,03 + 0,15 + 0,02) = 0.$$

Таким образом, проверка подтвердила правильность расчета допусков и предельных отклонений, соблюдение которых обеспечивает достижение требуемой точности зазора  $A_{\Delta}$  методом полной взаимозаменяемости.

### ***Достижение точности методом неполной взаимозаменяемости***

Сущность метода неполной (частичной) взаимозаменяемости заключается в том, что требуемая точность на замыкающем звене размерной цепи достигается не у всех изделий, а у подавляющего их большинства при включении в размерную цепь составляющих звеньев без какого-либо выбора, подбора или изменения их величин.

Этот метод основан на использовании положения теории вероятности, согласно которому формирование в одном изделии увеличивающих звеньев с наибольшими отклонениями  $\bar{\Delta}_i^B$ , и уменьшающих звеньев с наименьшими отклонениями  $\bar{\Delta}_i^H$  практически маловероятно. Фактические отклонения на составляющих звеньях группируются вокруг их средних значений. При данном методе представляется возможным за счет допущения определенного процента исправимого брака расширить допуски на составляющие звенья по сравнению с методом полной взаимозаменяемости до экономически целесообразных значений.

Поэтому при данном методе представляется возможным допустив определенный процент исправимого брака  $P$ , которому соответствует принятый процент риска  $t$ , расширить допуски на составляющие звенья по сравнению с методом полной взаимозаменяемости до экономически целесообразных значений.

При этом методе допуск на замыкающем звене определяется выражением

$$T_{\Delta} = t_{\Delta} \sqrt{\sum_{i=1}^{m-1} \lambda_i^2 T_i^2}, \quad (4.12)$$

где  $T_i$  – допуски на составляющие звенья;

$\lambda_i$  – коэффициент, характеризующий закон рассеяния отклонений на  $i$ -м составляющем звене;

$t_{\Delta}$  – коэффициент риска, характеризующий процент изделий, у которых отклонения на замыкающем звене выходят за пределы установленного допуска.

Выполнение расчетов с достаточной для практики точностью возможно при описании распределения отклонений на составляющих звеньях с помощью трех следующих законов:

1) закона нормального рассеяния (закон Гаусса), его действие проявляется в условиях крупносерийного и массового производства, для него  $\lambda^2 = 1/9$ ;

2) закона треугольника (закон Симпсона), его действие проявляется в серийном производстве, для него  $\lambda^2 = 1/6$ .

3) закона равной вероятности, его действие проявляется в единичном и мелкосерийном производстве, для него  $\lambda^2 = 1/3$ .

Коэффициент риска  $t_{\Delta}$ , характеризующий допускаемый процент брака, представляет собой отношение

$$t_{\Delta} = T_i / 2\sigma_i \text{ или } t_{\Delta} = x_i / \sigma_i,$$

где  $\sigma_i$  – среднеквадратическое отклонение;

$x_i$  – отклонение, равное половине поля допуска замыкающего звена.

Между принимаемым коэффициентом риска  $t_{\Delta}$  и допускаемым процентом брака  $P$ , % имеет место определенное соответствие:

$P$ , %	32	10	4,5	1,0	0,27	0,1	0,01
$t_{\Delta}$	1	1,65	2,0	2,57	3,0	3,29	3,89

Получаемый при этом брак является исправимым. Бракованные изделия разбирают, детали опять раскладывают по группам, а затем повторно собирают. И при другом сочетании деталей, входящих в сборочную единицу, собранное изделие оказывается годным.

Координату середины поля допуска замыкающего звена  $\Delta_{0\Delta}$  при этом методе рассчитывают также, как и при методе полной взаимозаменяемости:

$$\Delta_{0\Delta} = \sum_{i=1}^{i=k} \bar{\Delta}_{0i} - \sum_{i=k+1}^{i=m-1} \bar{\Delta}_{0i}.$$

При решении прямой задачи расчет точности выполняют в следующей последовательности:

1. Допуская определенный процент брака, принимают коэффициент  $t_{\Delta}$ , а затем, зная характер производства, определяют коэффициент  $\lambda^2$  и рассчитывают средний допуск на составляющие звенья:

$$T_{cp} = \frac{T_{\Delta}}{t_{\Delta} \sqrt{\lambda^2 (m-1)}}, \quad (4.13)$$

где  $m$  – число звеньев в цепи.

2. Ориентируясь на  $T_{cp}$ , назначают допуски и предельные отклонения на составляющие звенья с учетом сложности изготовления каждой детали:

$$T_1(\Delta^B, \Delta^H) \dots T_{m-1}(\Delta_{m-1}^B, \Delta_{m-1}^H).$$

3. Затем выполняют проверку по формулам:

$$t = \frac{T_{\Delta}}{\sqrt{\sum_{i=1}^{m-1} \lambda_i^2 \omega_i^2}} \quad (4.14)$$

зачи расчет точности вь;

$$(4.15)$$

процент брака, примим

Если необходимо выявить возможный процент брака при назначенных допусках на составляющие звенья  $T_i$  или при известных полях рассеяния  $\omega_i$  отклонений, то применяют формулу

$$t = \frac{T_{\Delta}}{\sqrt{\sum_{i=1}^{m-1} \lambda_i^2 \omega_i^2}} \quad (4.16)$$

Метод применяют для достижения точности в многозвенных цепях. Наиболее точные результаты достигаются при больших количествах сборок в крупносерийном и массовом производствах.

**Пример. Задача:** обеспечить требуемую точность зазора  $A_{\Delta}$  между корпусом и шестерней (рис. 4.16) методом неполной взаимозаменяемости при заданных выше условиях  $A_{\Delta} = 0$ ;  $\Delta_{\Delta}^B = 0,2$ ;  $\Delta_{\Delta}^H = 0$ ;  $\Delta_{0\Delta} = 0,1$  мм.

Расчет размерной цепи  $A_{\Delta}$  по методу неполной взаимозаменяемости выполняем для условия крупносерийного производства, при котором распределения отклонений на составляющих звеньях соответствуют нормальному закону рассеяния:  $\lambda^2 = 1/9$ . Допускаем  $P = 1\%$  исправимого брака и по таблице находим соответствующий ему коэффициент риска:

$$t_{\Delta} = 2,57.$$

Используя формулу (4.13), определяем  $T_{cp}$ :

$$T_{cp} = \frac{T_{\Delta}}{t \sqrt{\lambda^2 (m-1)}} = \frac{0,2}{2,57 \sqrt{1/9 (4-1)}} = 0,14.$$

Сравнение  $T_{cp}$ , полученных при методе полной взаимозаменяемости и при частичной взаимозаменяемости, показывает, что допущение небольшого риска  $P = 1\%$  позволило расширить средний допуск на составляющие звенья более чем в два раза:  $0,14 \text{ мм} > 0,066 \text{ мм}$ .

Ориентируясь на  $T_{cp}$ , назначаем допуски  $T_i$  и координаты середины полей допусков  $\Delta_{0i}$  на составляющие звенья с учетом сложности изготовления деталей узла:

	$A_1$	$A_2$	$A_3$
$T_{Ai}$	0,1	0,2	0,06
$\Delta_i^B$	0	0,2	0,08
$\Delta_i^H$	-0,1	0	0,02
$\Delta_{0i}$	-0,05	0,1	0,05

Правильность назначения допусков проверяем по формуле (4.12):

$$T_{\Delta} = 2,57 \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^{4-1} 1/9 \cdot (0,1^2 + 0,2^2 + 0,06^2)} = 0,2 \text{ мм.}$$

Назначив координаты середины полей допусков  $\Delta_{0i}$  и соответствующие предельные отклонения  $\Delta_{i}^B, \Delta_{i}^H$ , выполняем окончательную проверку по формулам (4.14), (4.15):

$$\begin{aligned} \Delta_{\Delta}^B &= [0,1 - (-0,05 + 0,05)] + 0,5 \cdot 0,2 = 0,2 \text{ мм;} \\ \Delta_{\Delta}^H &= [0,1 - (-0,05 + 0,05)] - 0,5 \cdot 0,2 = 0. \end{aligned}$$

Проверка подтвердила правильность назначенных допусков и предельных отклонений.

### *Достижение точности методом групповой взаимозаменяемости*

Сущность метода групповой взаимозаменяемости заключается в том, что требуемая точность замыкающего звена достигается путем включения в размерную цепь составляющих звеньев, принадлежащих к одной из групп, на которые звенья были предварительно рассортированы.

Расчет размерной цепи по методу групповой взаимозаменяемости выполняют в определенной последовательности.

1. Вначале задачу пытаются решить с использованием метода полной взаимозаменяемости и по формуле (4.7) находят средний допуск для составляющих звеньев:

$$T_{\text{cp}} = \frac{T_{\Delta}}{m-1}.$$

2. Если полученный допуск  $T_{\text{cp}}$  оказывается по величине маленьким (жестким), то его увеличивают в  $n$  раз, где  $n$  – предполагаемое число групп сортировки. В результате получаем расширенный средний допуск:

$$T'_{\text{cp}} = n T_{\text{cp}}. \quad (4.17)$$

3. Ориентируясь на  $T'_{\text{cp}}$ , назначают расширенные допуски на составляющие звенья  $T'_i$ , величина которых должна быть кратна числу  $n$ . При этом необходимо учитывать два расчетных условия реализации данного метода:

*условие 1* – сумма допусков увеличивающих звеньев должна равняться сумме допусков уменьшающих:

$$\sum_{i=1}^{i=k} \bar{T}'_i = \sum_{i=k+1}^{i=m-1} \bar{T}'_i, \quad (4.18)$$

где  $k$  – число увеличивающих звеньев размерной цепи;

*условие 2* – координата середины поля допуска, получаемая на за-

мыкающем звене при расширенных допусках  $\Delta'_{0\Delta}$ , должна быть равна требуемой координате середины поля допуска (см. рис. 4.16):

$$\Delta'_{0\Delta} = \sum_{i=1}^{i=k} \Delta'_{0i} - \sum_{i=k}^{i=m-1} \Delta'_{0i} = \Delta_{0i} . \quad (4.19)$$

Для эффективной реализации этого метода необходимо также выполнение двух технологических условий:

1. Допуски на составляющие звенья, ограничивающие относительный поворот, отклонения формы и шероховатость поверхностей деталей, должны соответствовать не расширенным допускам  $T'_i$ , а устанавливаться в соответствии с численными значениям групповых допусков  $T'_i/n$ .

2. Обеспечение идентичности законов рассеяния отклонений на со-

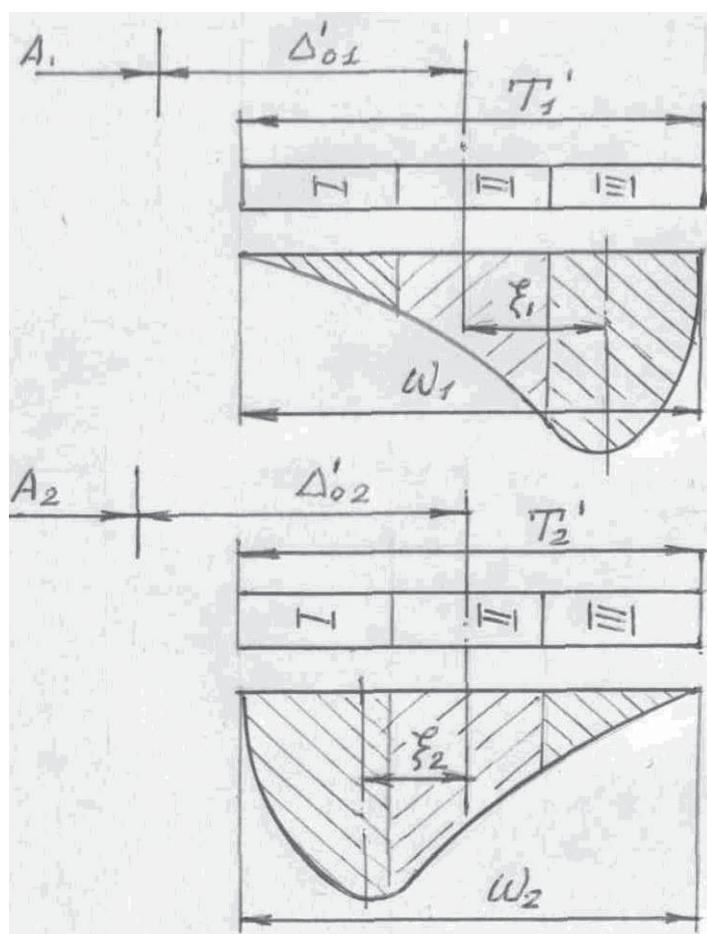


Рис. 4.16. Схема влияния идентичности законов рассеяния отклонений составляющих звеньев на формирование комплектности соединяемых деталей

ставляющих звеньях (рис. 4.16). Данное условие вытекает из необходимости получения комплектности деталей для собираемых изделий. Невыполнение этого условия приводит к тому, что в одинаковых группах оказывается различное число деталей. На рис. 4.16 наглядно показано, что различные смещения центра группирования отклонений относительно середины поля допуска у двух соединяемых деталей  $\xi_1 \neq \xi_2$  приводят к формированию разного числа парных деталей в группах I и III. В результате в этих двух группах остается большое число некомплектных (невыстроенных) деталей. Идентичность законов рассеяния от-

клонений на составляющих звеньях достигают путем правильной настройки станков при изготовлении комплектующих деталей изделия.

В результате выполненного расчета составляют таблицу сортировки деталей по группам размеров, которая в общем случае имеет вид:

Группа размеров	A <sub>1</sub>		A <sub>2</sub>		...	A <sub>m-1</sub>	
	Δ <sub>1</sub> <sup>B</sup>	Δ <sub>1</sub> <sup>H</sup>	Δ <sub>2</sub> <sup>B</sup>	Δ <sub>2</sub> <sup>H</sup>	...	Δ <sub>(m-1)</sub> <sup>B</sup>	Δ <sub>(m-1)</sub> <sup>H</sup>
I группа	Δ <sub>1,I</sub> <sup>B</sup>	Δ <sub>1,I</sub> <sup>H</sup>	Δ <sub>2,I</sub> <sup>B</sup>	Δ <sub>2,I</sub> <sup>H</sup>	...	Δ <sub>(m-1),I</sub> <sup>B</sup>	Δ <sub>(m-1),I</sub> <sup>H</sup>
II группа	Δ <sub>1,II</sub> <sup>B</sup>	Δ <sub>1,II</sub> <sup>H</sup>	Δ <sub>2,II</sub> <sup>B</sup>	Δ <sub>2,II</sub> <sup>H</sup>	...	Δ <sub>(m-1),II</sub> <sup>B</sup>	Δ <sub>(m-1),II</sub> <sup>H</sup>
J...	...	...	...	...	...	...	...
n-я группа	Δ <sub>1,n</sub> <sup>B</sup>	Δ <sub>1,n</sub> <sup>H</sup>	Δ <sub>2,n</sub> <sup>B</sup>	Δ <sub>2,n</sub> <sup>H</sup>	...	Δ <sub>(m-1),n</sub> <sup>B</sup>	Δ <sub>(m-1),n</sub> <sup>H</sup>

По горизонтали располагают звенья цепи, а по вертикали для каждого звена располагают рассчитанные предельные отклонения, относящиеся к каждой из групп.

При сборке с использованием метода групповой взаимозаменяемости соединение деталей, принадлежащих к одной группе, обеспечивает достижение точности замыкающего звена по полной взаимозаменяемости, а при рассмотрении всех групп имеет место групповая взаимозаменяемость.

В соответствии с этим, для проверки правильности разбиения расширенных допусков T'<sub>i</sub> на группы и проверки правильности назначения предельных отклонений в каждой из групп, можно использовать формулы предельных отклонений (4.7), (4.8), которые в общем случае для всех n групп имеют вид:

$$\Delta_{\Delta}^B = \sum_{i=1}^{i=k} \bar{\Delta}_{ij}^B - \sum_{i=k+1}^{i=m-1} \bar{\Delta}_{ij}^H, \quad (4.20)$$

$$\Delta_{\Delta}^H = \sum_{i=1}^{i=k} \bar{\Delta}_{ij}^H - \sum_{i=k+1}^{i=m-1} \bar{\Delta}_{ij}^B. \quad (4.21)$$

где j – номер соответствующей группы сортировки, j = (1...n).

Метод групповой взаимозаменяемости применяют для достижения высокой точности в малозвенных размерных цепях, например для обеспечения требуемой точности зазора между телами качения и двумя кольцами при сборке прецизионных подшипников. Применение этого метода в многозвенных цепях требует выполнения большого объема работ, связанных с измерением деталей и их сортировкой, что сводит на нет его эффективность. Поэтому этот метод обычно применяют в 3- и 4-звенных размерных цепях.

**Пример. Задача:** Рассчитать размерную цепь  $A_{\Delta}$ , определяющую зазор между корпусом и шестерней (см. рис. 4.15) методом групповой взаимозаменяемости при заданных условиях:  $A_{\Delta} = 0$ ;  $\Delta_{\Delta}^B = 0,2$ ;  $\Delta_{\Delta}^H = 0$ ;  $\Delta_{0\Delta} = 0,1$  мм.

Рассчитываем средний допуск  $T_{cp}$  по формуле (4.6):

$$T_{cp} = \frac{0,2}{4-1} = 0,066.$$

Так как полученный средний допуск оказался маленьким, достаточно жестким, то расширяем его в 3 раза, где  $n = 3$  – принимаемое число групп сортировки. В результате получаем расширенный средний допуск:

$$T'_{cp} = T_{cp} \cdot n = 0,066 \cdot 3 = 0,2 \text{ мм.}$$

Ориентируясь на полученный допуск  $T'_{cp}$ , назначаем расширенные допуски  $T'_i$  и предельные отклонения  $\Delta_i^B, \Delta_i^H$  на составляющие звенья с учетом сложности изготовления деталей. Назначаемые допуски должны быть кратны принятому числу групп сортировки  $n = 3$ . При этом необходимо обеспечить выполнение первого расчетного условия (4.18), которое в данном случае имеет вид

$$T_2 = T_1 + T_3; 0,3 = 0,24 + 0,06.$$

Предельные отклонения на составляющие звенья  $\Delta_i^B, \Delta_i^H$  и соответствующие координаты середин полей допусков  $\bar{\Delta}_{0i}$  назначают с учетом выполнения второго расчетного условия (4.19):

$$\bar{\Delta}'_{02} - (\bar{\Delta}'_{01} + \bar{\Delta}'_{03}) = \Delta'_{0\Delta} = \Delta_{0\Delta},$$

которое в численном выражении имеет вид

$$0,15 - (0,04 + 0,01) = 0,1 = 0,1.$$

В результате расчетов получаем следующие значения допусков и предельных отклонений на составляющие звенья:

	$\bar{A}_1$	$\bar{A}_2$	$\bar{A}_3$
$T'_i$	0,24 (0,08·3)	0,3 (0,1·3)	0,06 (0,02·3)
$\Delta_i^{B'}$	0,16	0,3	0,04
$\Delta_i^{H'}$	-0,08	0	-0,02
$\Delta'_{0i}$	0,04	0,15	0,01

На основе полученных данных составляем таблицу сортировки деталей по группам размеров:

Группа размеров	$\bar{A}_1$		$\bar{A}_2$		$\bar{A}_3$	
	$\Delta_1^B$	$\Delta_1^H$	$\Delta_2^B$	$\Delta_2^H$	$\Delta_3^B$	$\Delta_3^H$
I группа	0	-0,08	0,1	0,0	0,0	-0,02
II группа	0,08	0	0,2	0,1	0,02	0
III группа	0,16	0,08	0,3	0,2	0,04	0,02

Проверку правильности расчета для всех групп разбиения выполняем по формулам (4.20), (4.21), которые в данном случае имеют вид

$$\Delta_{\Delta}^B = \bar{\Delta}_2^B - (\bar{\Delta}_1^H + \bar{\Delta}_3^H); \quad \Delta_{\Delta}^H = \bar{\Delta}_2^H - (\bar{\Delta}_1^B + \bar{\Delta}_3^B).$$

Проверка для I группы:

$$\Delta_{\Delta}^B = 0,1 - (-0,08 - 0,02) = 0,2; \quad \Delta_{\Delta}^H = 0 - (0 - 0) = 0.$$

Проверка для II группы:

$$\Delta_{\Delta}^B = 0,2 - (0 + 0) = 0,2; \quad \Delta_{\Delta}^H = 0,1 - (0,08 + 0,02) = 0.$$

Проверка для III группы:

$$\Delta_{\Delta}^B = 0,3 - (0,08 + 0,02) = 0,2; \quad \Delta_{\Delta}^H = 0,2 - (0,16 + 0,04) = 0.$$

Таким образом, проверка подтвердила правильность расчета. В пределах каждой группы имеет место полная взаимозаменяемость, а в рамках всех групп – групповая взаимозаменяемость. Сравнение допусков на составляющих звеньях, получаемых при данном методе достижения точности, с соответствующими допусками при методе полной взаимозаменяемости показывает, что использование метода групповой взаимозаменяемости позволяет расширить допуски в два-три раза.

### ***Достижение точности методом регулирования***

*Сущность метода регулирования заключается в том, что требуемая точность на замыкающем звене обеспечивается за счет изменения величины заранее выбранного звена-компенсатора без снятия с него слоя материала.* Имеют место две разновидности метода регулирования – регулировка с использованием подвижного компенсатора и регулировка с использованием неподвижного компенсатора.

Компенсация отклонений на замыкающем звене с использованием подвижного компенсатора обеспечивается путем перемещения подвижного звена – компенсатора на требуемую величину. Роль компенсатора могут выполнять различные регулировочные винты, клинья и другие подвижные детали, которые перемещаются на требуемую величину и фиксируются в нужном положении. Такой компенсатор должен

быть заранее заложен в конструкции изделия. Для примера на рис. 2.2 представлен рассматриваемый узел – редуктор, в котором с целью обеспечения требуемого зазора между шестерней и стенкой корпуса предусмотрена подвижная втулка. Эта втулка перемещается на требуемую величину и фиксируется стопорным винтом в необходимом положении.

При регулировке с использованием неподвижного компенсатора отклонения на замыкающем звене компенсируются за счет подбора и ввода в цепь компенсатора требуемого размера. Роль компенсатора в этом случае выполняют различные мерные прокладки, шайбы, кольца, размеры которых и необходимое количество групп определяют расчетным путем. Звено, выполняющее роль неподвижного компенсатора, предусматривается конструктором на стадии проектирования изделия.

Расчет числа групп неподвижных компенсаторов и их размеров выполняется в следующей последовательности:

1. На составляющие звенья размерной цепи устанавливают расширенные экономически целесообразные допуски  $T'_1, T'_2, T'_3 \dots T'_{m-1}$ .

2. Затем определяют величину компенсации  $T_k$  – наибольшую возможную величину регулировки:

$$T_k = \sum_{i=1}^{i=m-1} T'_i - T_{\Delta}, \quad (4.22)$$

где  $T_{\Delta}$  – допуск на замыкающем звене.

3. Число групп компенсаторов  $N$  рассчитывают по формуле

$$N = \frac{T_k}{T_{\Delta} - T_{\text{ком}}} + 1, \quad (4.23)$$

где  $T_{\text{ком}}$  – допуск на звено компенсатор.

Если в результате расчета число групп компенсаторов  $N$  получается дробное, то для получения ближайшего целого числа  $N$  необходимо расширить допуск у одного или нескольких составляющих звеньев до значения, при котором деление величины компенсации на разность допусков замыкающего звена и компенсатора дает целое число.

4. Предельные отклонения звена компенсатора  $\Delta_{\text{к}}^{\text{в}}$ ,  $\Delta_{\text{н}}^{\text{к}}$  определяют по формулам:

$$\Delta_{\text{к}}^{\text{в}} = \Delta'_{\Delta}{}^{\text{в}} - \Delta_{\Delta}^{\text{в}} + T_{\text{ком}}^{\text{в}}, \quad (4.24)$$

$$\Delta_{\text{н}}^{\text{к}} = \Delta'_{\Delta}{}^{\text{н}} - \Delta_{\Delta}^{\text{н}} + T_{\text{ком}}^{\text{н}}, \quad (4.25)$$

где  $\Delta_{\Delta}^{\text{в}}$ ,  $\Delta_{\Delta}^{\text{н}}$  – требуемые предельные отклонения на замыкающем звене.

$\Delta'_{\Delta}{}^{\text{в}}$ ,  $\Delta'_{\Delta}{}^{\text{н}}$  – предельные отклонения на замыкающем звене, получаемые при расширенных допусках  $T'_i$  без учета звена компенсатора ( $m - 2$ ):

$$\Delta_{\Delta}^{'B} = \sum_{i=1}^{i=k} \vec{\Delta}_i^{'B} - \sum_{k+1}^{m-2} \overleftarrow{\Delta}_i^{'H}; \quad (4.26)$$

$$\Delta_{\Delta}^{'H} = \sum_{i=1}^{i=k} \vec{\Delta}_i^{'H} - \sum_{k+1}^{m-2} \overleftarrow{\Delta}_i^{'B}. \quad (4.27)$$

Подставив полученные значения  $\Delta_{\Delta}^{'B}$  и  $\Delta_{\Delta}^{'H}$  в выражения (4.24), (4.25), находим предельные отклонения компенсаторов  $\Delta_k^B, \Delta_H^k$ , которые относятся соответственно к предельным отклонениям компенсаторов I-й и последней N-й группам.

	I	II	...	N
$\Delta^B$	$\Delta_I^B$	$\Delta_{II}^B$	...	$\Delta_N^B = \Delta_k^B$
$\Delta^H$	$\Delta_I^H = \Delta_k^H$	$\Delta_{II}^H$	...	$\Delta_N^H$

5. Для определения предельных отклонений компенсаторов в каждой из групп необходимо рассчитать величину ступени компенсации  $P$ :

$$P = \frac{\Delta_{\Delta}^{'B} - \Delta_{\Delta}^{'H}}{N}. \quad (4.28)$$

Предельные отклонения компенсаторов в каждой из групп связаны выражением  $T_{\text{ком}} = \Delta_i^B - \Delta_i^H$ , из которого следует, что

$$\Delta_i^B = \Delta_k^H + T_{\text{ком}}; \quad \Delta_N^H = \Delta_k^B - T_{\text{ком}}. \quad (4.29)$$

В свою очередь предельные отклонения в соседних группах определяют путем прибавления ступени компенсации:

$$\Delta_{II}^B = \Delta_I^B + P; \quad \Delta_{II}^H = \Delta_I^H + P. \quad (4.30)$$

В результате определяют предельные отклонения в каждой из групп компенсаторов и заносят их в приведенную выше таблицу.

В соответствии с рассчитанными размерами изготавливают  $N$  групп компенсаторов, а затем в процессе сборки измеряют фактическое отклонение на замыкающем звене и для достижения требуемой точности устанавливают компенсатор требуемого размера. С этой целью составляют таблицу соответствия, в которой в верхней строке указывают пределы отклонений  $\Delta'_{\Delta}$ , а в нижней – компенсаторы соответствующей группы:

Пределы отклонений $\Delta'_{\Delta}, (\Delta^B_{\Sigma}, \Delta^H_{\Sigma})$	от $\Delta^H_{\Delta}$ до $\Delta^H_{\Delta} + P$	от $(\Delta^H_{\Delta} + P)$ до $\Delta^H_{\Delta} + 2P$	...	от $\Delta^H_{\Delta} + (N-1)P$ до $\Delta^B_{\Delta}$
Применяемые компенсаторы	I	II	...	N

Для проверки правильности расчета числа групп и размеров компенсаторов рассматриваемую цепь представляют как трехзвенную, например:

$$A_{\Delta} = A_{\Sigma} - A_k,$$

где  $A_{\Delta}$  – замыкающее звено;  $A_{\Sigma}$  – звено, представляющее сумму составляющих звеньев без компенсатора;  $A_k$  – звено-компенсатор.

В соответствии с этим проверку правильности расчета размеров каждой группы компенсаторов можно выполнить по формулам предельных отклонений:

$$\Delta^B_{\Delta} = \Delta^B_{\Sigma} - \Delta^H_k, \quad (4.31)$$

$$\Delta^H_{\Delta} = \Delta^H_{\Sigma} - \Delta^B_k, \quad (4.32)$$

где  $\Delta^B_{\Delta}, \Delta^H_{\Delta}$  – требуемые предельные отклонения на замыкающем звене;  $\Delta^B_{\Sigma}, \Delta^H_{\Sigma}$  – фактические предельные отклонения на замыкающем звене в каждом из интервалов, представленных в первой строке таблицы соответствия.

Применение метода регулировки обеспечивает возможность достижения и поддержания в процессе эксплуатации и ремонта узла высокой степени точности. Его реализация не требует больших временных затрат и не представляет сложности при нормировании операций, поэтому его широко используют также в поточном производстве. Применение метода особенно эффективно для достижения требуемой точности в многозвенных размерных цепях.

**Пример. Задача:** рассчитать размерную цепь  $A_{\Delta}$ , обеспечив достижение требуемого зазора между корпусом и шестерней  $A_{\Delta} = 0$ ;  $\Delta^B_{\Delta} = 0,2$ ;  $\Delta^H_{\Delta} = 0$ ;  $\Delta_{0\Delta} = 0,1$  мм (см. рис. 4.15) методом регулировки с использованием неподвижного компенсатора.

Анализ размерной цепи  $A_{\Delta}$  показывает, что в конструкции узла заложена возможность применения метода регулировки с неподвижным компенсатором, роль которого может выполнять шайба – звено  $A_3$ . Расчет размерной цепи выполняем согласно изложенной выше методике.

1. Назначаем на составляющие звенья расширенные экономически целесообразные допуски и предельные отклонения:

	$\bar{A}_1$	$\bar{A}_2$	$\bar{A}_3$
$T_{Ai}$	0,2	0,35* 0,4	0,05
$\Delta_i^B$	0	0,35* 0,4	0
$\Delta_i^H$	-0,2	0	-0,05

\* цифры со звездочкой означают первоначально заданные значения, которые в процессе расчета изменены на значения, приведенные ниже

2. По формуле (4.22) определяем величину компенсации:

$$T_k = (0,2 + 0,35 + 0,05) - 0,2 = 0,4.$$

3. Определяем число групп компенсаторов по формуле (4.23):

$$N = \frac{0,4}{0,2 - 0,05} + 1 = 3,8.$$

Для получения целого числа  $N$  расширяем допуск на звене  $A_2$  (корпус) на величину 0,05 и получаем новый допуск:  $T_2 = 0,35 + 0,05 = 0,4$ .

В результате величина компенсации составит  $T_k = 0,45$ , а число групп компенсаторов определяется целым числом:

$$N = 0,45 / (0,2 - 0,05) + 1 = 4.$$

4. Определяем предельные отклонения компенсаторов по формулам (4.24), (4.25), для чего сначала выполняем расчет предельных отклонений на замыкающем звене по формулам (4.26), (4.27):

$$\Delta_{\Delta}^B = \bar{\Delta}_2^B - \bar{\Delta}_1^H = 0,4 - (-0,2) = 0,6; \quad \Delta_{\Delta}^H = \bar{\Delta}_2^H - \bar{\Delta}_1^B = 0 - 0 = 0.$$

В результате предельные отклонения компенсатора составят:

$$\Delta_k^B = \Delta_4^B = 0,6 - 0,2 + 0,05 = 0,45 \quad \Delta_k^H = \Delta_1^H = 0 - 0 - 0,05 = -0,05,$$

	1	2	3	4
$\Delta_i^B$	0	0,15	0,3	0,45
$\Delta_i^H$	-0,05	0,1	0,25	0,4

Недостающие предельные отклонения в крайних группах получены согласно (4.29):

$$\Delta_1^B = \Delta_1^H + T_{\text{КОМ}} = -0,05 + 0,05 = 0; \quad \Delta_4^H = \Delta_{IV}^B - T_{\text{КОМ}} = 0,45 - 0,05 = 0,4.$$

Определяем по формуле (4.28) величину степени компенсации

$$P = \frac{0,6 - 0}{4} = 0,15,$$

а затем по формулам (4.30) находим предельные отклонения в группах:

$$\Delta_{II}^B = 0 + 0,15 = 0,15; \Delta_{III}^B = 0,15 + 0,15 = 0,3;$$

$$\Delta_I^H = -0,05 + 0,15 = 0,1; \Delta_{III}^H = 0,1 + 0,15 = 0,25.$$

В результате получаем следующие размеры компенсаторов:

Группа	I	II	III	IV
Размер	$5_{-0,05}^0$	$5_{-0,1}^{0,15}$	$5_{-0,25}^{0,3}$	$5_{-0,4}^{0,45}$

Таблица соответствия отклонений на замыкающем звене и выбираемых компенсаторов имеет вид:

Пределы отклонений $\Delta'_{\Delta}, (\Delta_{\Sigma}^B, \Delta_{\Sigma}^H)$	от 0,00 до 0,15	от 0,15 до 0,3	от 0,3 до 0,45	от 0,45 до 0,6
Применяемые компенсаторы	I	II	III	IV

Для проверки правильности расчета представим рассматриваемую размерную цепь  $A_{\Delta}$  как трехзвенную:

$$A_{\Delta} = A_{\Sigma} - A_K; A_{\Sigma} = A_1 + A_2; A_K = A_3.$$

В результате согласно (4.31) и (4.32) получим:

$$\text{Для группы I: } \Delta_{\Delta}^B = 0,15 - (-0,05) = 0,2; \Delta_{\Delta}^H = 0 - 0 = 0.$$

$$\text{Для группы II: } \Delta_{\Delta}^B = 0,3 - 0,1 = 0,2; \Delta_{\Delta}^H = 0,15 - 0,15 = 0.$$

$$\text{Для группы III: } \Delta_{\Delta}^B = 0,45 - 0,25 = 0,2; \Delta_{\Delta}^H = 0,3 - 0,3 = 0.$$

$$\text{Для группы IV: } \Delta_{\Delta}^B = 0,6 - 0,4 = 0,2; \Delta_{\Delta}^H = 0,45 - 0,45 = 0.$$

Таким образом, проверка показывает, что расчет групп и размеров компенсаторов выполнен правильно. Использование нужного компенсатора при соответствующем отклонении на замыкающем звене позволяет всегда выйти на требуемый допуск замыкающего звена (рис. 4.17).

Сравнение допусков на составляющие звенья при методе регулировки с допусками на соответствующие звенья при методе полной взаимозаменяемости показывает, что использование метода регулировки позволило в четыре-шесть раз расширить допуски на составляющие звенья, обеспечив более экономичное изготовление узла.

### Достижение точности методом пригонки

Сущность метода пригонки заключается в том, что требуемая точность на замыкающем звене достигается путем изменения величины заранее выбранного звена компенсатора путем снятия с него определенного слоя материала.

Слой материала с компенсатора может сниматься различными методами – шлифованием, тонким точением, шабровкой и др. Все это означает необходимость выполнения трудоемких пригоночных ручных работ, которые включают измерения фактической точности на замыкающем звене и выполнение

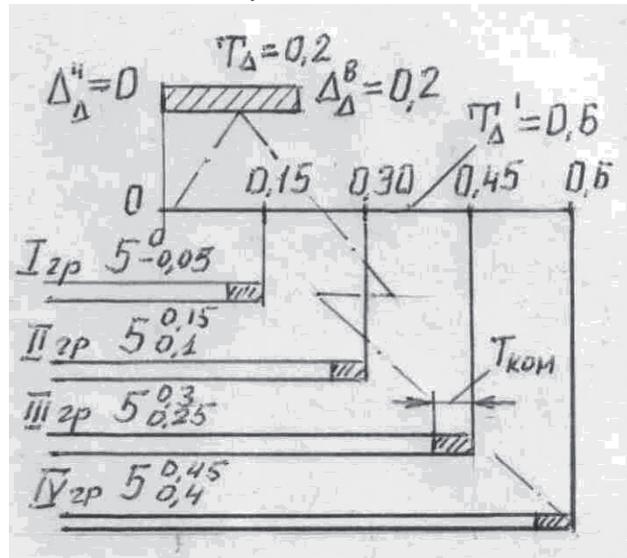


Рис. 4.17. Схема соответствия выбираемого компенсатора фактическому отклонению на замыкающем звене

пригонки для устранения недопустимых отклонений.

Методика расчета точности при использовании этого метода заключается в следующем:

1. На все составляющие звенья устанавливают расширенные экономически целесообразные допуски  $T'_1, T'_2, T'_3, \dots, T'_{m-1}$ .

2. Затем определяют величину компенсации  $T_k$  по формуле

$$T_k = \sum_{i=1}^{i=m-1} T'_i - T_{\Delta}, \quad (4.33)$$

Величина компенсации, в данном случае  $T_k$ , представляет собой наибольший возможный слой материала, который может быть удален с компенсатора для достижения требуемой точности замыкающего звена. Для того чтобы на звене-компенсаторе гарантированно иметь минимальный и достаточный слой материала, позволяющий компенсировать наибольшее возможное отклонение, в координату середины поля допуска компенсатора необходимо внести поправку  $\Delta_k$ . Величина вносимой поправки рассчитывается по формуле

$$\Delta_k = \sum_{i=1}^{i=m-1} \Delta_{0i} - \Delta_{0\Delta} + \frac{T_k}{2}, \quad (4.34)$$

где  $\Delta_{0i}$  – координаты середины полей допусков на принятых производственных допусках  $T'_1, \dots, T'_{m-1}$ , которые суммируют алгебраически с уче-

том знака координаты и характера звена согласно выражению (4.9) ;

$\Delta_{0\Delta}$  – требуемая координата середины поля допуска на замыкающем звене.

В случае симметричного расположения полей допусков, когда  $\Delta_{0i} = 0$ ,  $\Delta_{0\Delta} = 0$ , величина вносимой поправки составляет  $\Delta_k = 0,5T_k$ .

В качестве компенсатора рекомендуется выбирать деталь с малыми габаритными размерами, пригонка которой менее трудоемка.

Применение метода пригонки позволяет обеспечить достижение высокой точности при установлении на деталях узла расширенных, экономически целесообразных допусков. Недостатками этого метода являются:

1) необходимость выполнения дополнительных пригоночных работ, большинство из которых выполняются вручную;

2) значительный разброс времени на выполнение пригонки, что затрудняет нормирование и усложняет организацию поточного производства с постоянным тактом выпуска.

Поэтому метод пригонки применяют в условиях непоточного производства для многозвенных размерных цепей. Этот метод используют при настройке станков на точность с использованием пробных проходов, когда обрабатываемая заготовка одновременно выполняет роль замыкающего звена и компенсатора.

**Пример.** Рассчитать размерную цепь  $A_\Delta$ , определяющую зазор между корпусом и шестерней ( $A_\Delta = 0$ ;  $\Delta_\Delta^B = 0,2$ ;  $\Delta_\Delta^H = 0$ ;  $\Delta_{0\Delta} = 0,1$  мм) (см. рис. 4.15), с использованием метода пригонки.

1. Назначаем на составляющие звенья еще более широкие допуски и предельные отклонения:

$A_i$	$\bar{A}_1$	$\bar{A}_2$	$\bar{A}_3$
$T_{Ai}$	0,3	0,4	0,1
$\Delta_i^B$	0	0,4	0,3
$\Delta_i^H$	-0,3	0	0,2
$\Delta_{0i}$	-0,15	0,2	0,25

В качестве звена-компенсатора выбираем шайбу – звено  $A_3$ . Затем рассчитываем согласно (4.33) величину компенсации:

$$T_k = \sum_{i=1}^{i=4-1} T'_i - T_\Delta = (0,3 + 0,4 + 0,1) - 0,2 = 0,6.$$

По формуле (4.34) определяем величину поправки, которую необходимо внести в координату середины поля допуска компенсатора:

$$\Delta_k = \sum_{i=1}^{i=4-1} \Delta_{0i} - \Delta_{0\Delta} + \frac{T_k}{2} = 0,6/2 + (0,15 + 0,2 - 0,25) - 0,1 = 0,3.$$

В результате внесения поправки координата середины поля допуска звена-компенсатора составит

$$\Delta_{03}^* = 0,25 + \Delta_k = 0,25 + 0,3 = 0,55.$$

Это позволит получить на компенсаторе слой металла достаточный для устранения возможного наибольшего отклонения замыкающего звена.

Сравнение допусков на составляющие звенья при методе пригонки с допусками при методе полной взаимозаменяемости показывает, что переход на метод пригонки позволяет в несколько раз расширить допуски на составляющие звенья.

#### **4.5. Цепной, координатный и комбинированный методы получения и измерения точности размеров деталей машин**

В процессе изготовления деталей, в процессе сборки и измерения применяют три различных метода получения и измерения достигнутых линейных и угловых размеров – цепной, координатный и комбинированный.

##### ***Цепной метод***

При этом методе каждый последующий размер – расстояние или поворот – получают или измеряют вслед за предварительно полученным линейным или угловым размером. В качестве технологической или измерительной базы в этом случае служит связывающая их общая поверхность.

На рис. 4.18 представлена схема получения цепным методом размеров ступенчатого вала при его обработке на токарном станке. Согласно схеме в начале от базы *a* обрабатывают ступень 1, затем от полученной поверхности *b* обрабатывают ступень 2 и от полученной базы *b* аналогично обрабатывают ступень 3. В результате каждый цепной размер  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_3$  получают последовательно вслед за предыдущим от предварительно полученной технологической и измерительной базы *a*, *b*, *b*. Таким образом, каждый раз осуществляется переход к новой технологической и измерительной базе. В результате точность каждого получае-

мого цепного размера  $\omega_{A1}$ ,  $\omega_{A2}$ ,  $\omega_{A3}$  зависит только от точности выполнения одного соответствующего перехода и не зависит от погрешности получения других размеров.

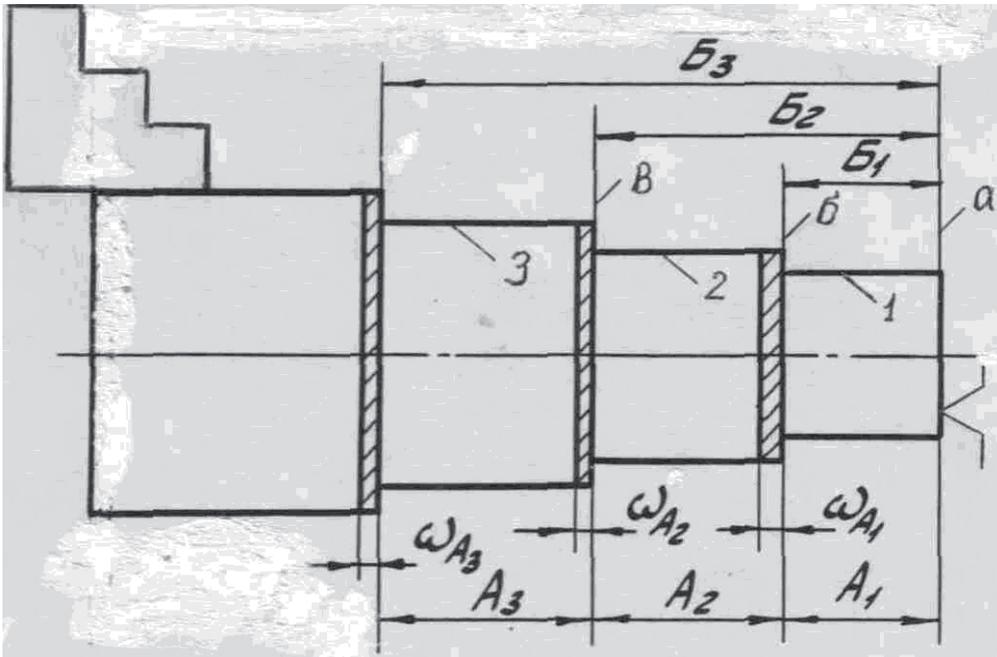


Рис. 4.18. Получение линейных размеров цепным методом

Однако погрешность любого координатного звена  $B_1$ ,  $B_2$ ,  $B_3$ , определяющего положение получаемых ступеней относительно одной, например первой базовой поверхности  $a$ , при этом методе равна сумме погрешностей цепных звеньев, образующих данное координатное звено:

$$B_1 = A_1; B_2 = A_1 + A_2; B_3 = A_1 + A_2 + A_3;$$

$$\omega_{B1} = \omega_{A1}; \omega_{B2} = \omega_{A1} + \omega_{A2}; \omega_{B3} = \omega_{A1} + \omega_{A2} + \omega_{A3}.$$

Приведенные выражения показывают, что погрешности координатных звеньев возрастают по мере увеличения числа цепных звеньев, образующих данное координатное звено.

В соответствии с изложенным основным преимуществом цепного метода является независимость погрешности, получаемой на каждом из цепных звеньев  $\omega_{A1}$ ,  $\omega_{A2}$ ,  $\omega_{A3}$ , от погрешностей остальных звеньев.

Этот метод используют в тех случаях, когда возникает необходимость достижения более высокой точности линейного или углового размера между двумя обрабатываемыми поверхностями. При этом для его реализации необходимо осуществлять организованную смену технологических и измерительных баз.

### Координатный метод

Согласно этому методу (рис. 4.19) линейные размеры  $B_1, B_2, B_3$  или относительные повороты  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$  получают (измеряют) от одной и той же заранее выбранной базы  $a$  независимо один от другого. В результате, погрешности  $\omega_{B_1}, \omega_{B_2}, \omega_{B_3}$ , получаемые на каждом из координатных звеньев, не зависят от погрешностей других звеньев. Они зависят только от точности выполнения определенного технологического или измерительного перехода, при выполнении которого образуется данное координатное звено.

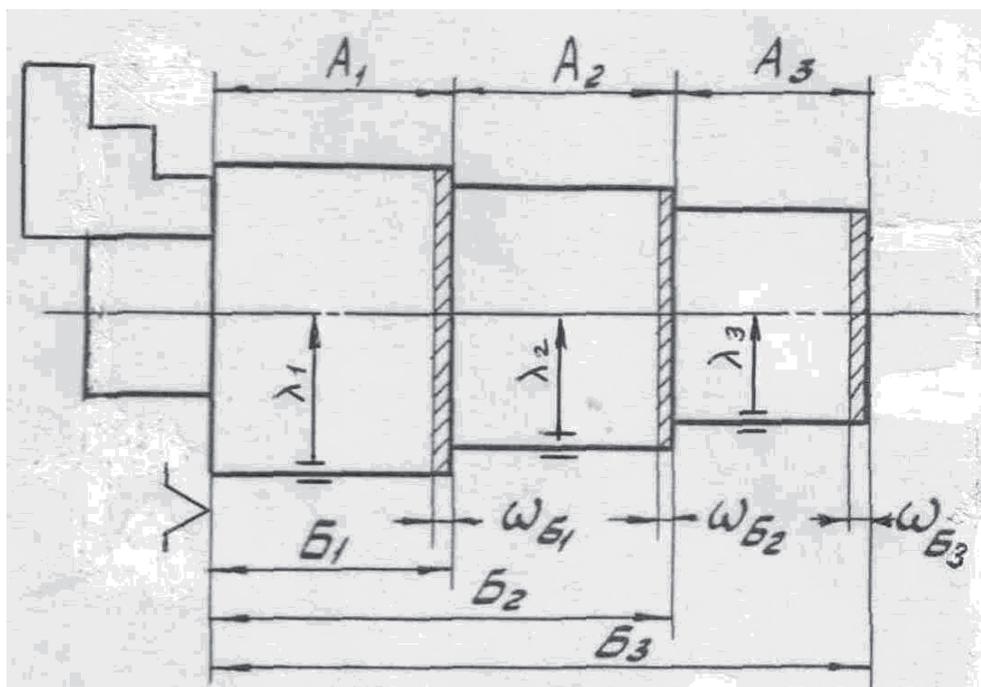


Рис. 4.19. Получение линейных размеров ступенчатого вала координатным методом

Одновременно погрешность любого цепного звена  $A_1, A_2, A_3$  при координатном методе получения размеров не превышает суммы погрешностей двух координатных звеньев, образующих данное координатное звено:

$$A_1 = B_1; A_2 = B_1 - B_2; A_3 = B_3 - B_2;$$
$$\omega_{A_1} = \omega_1; \omega_{A_2} = \omega_1 + \omega_2; \omega_{A_3} = \omega_2 + \omega_3.$$

Другим важным преимуществом координатного метода является то, что при получении всех координатных звеньев погрешность установки заготовки остается неизменной. В отличие от цепного метода отпадает необходимость организованной смены измерительных или тех-

нологических баз для получения новых размеров. Поэтому погрешность установки оказывает значительно меньшее влияние на точность изготавливаемой детали по сравнению с цепным методом, когда для получения каждого цепного звена необходимо переходить на новую измерительную или технологическую базу.

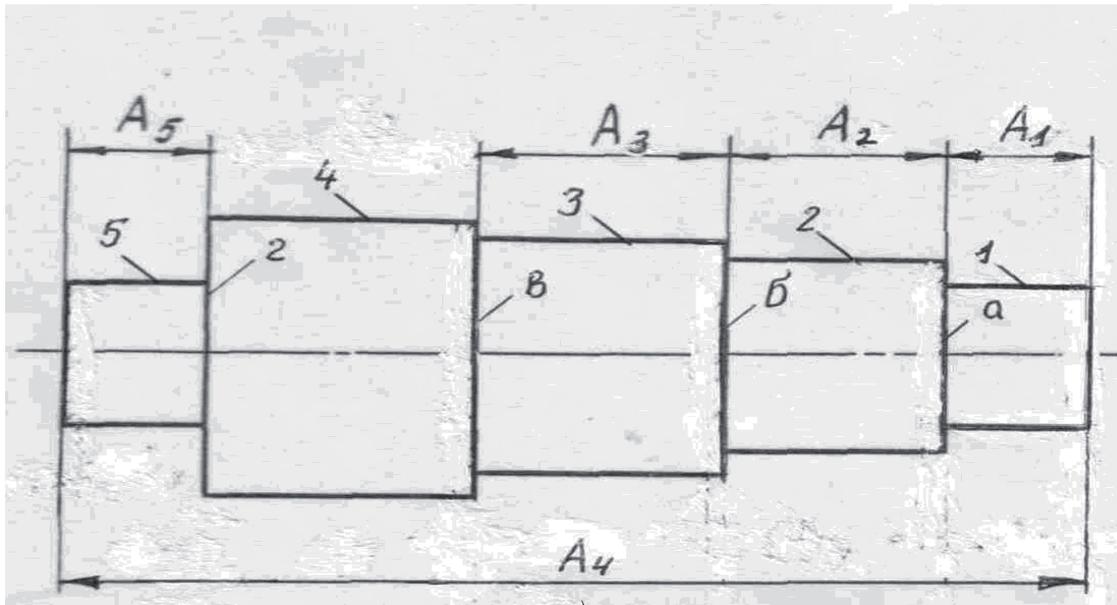
Таким образом, основным преимуществом координатного метода является соблюдение принципа единства баз, при котором исключается влияние погрешности установки заготовки на точность относительного положения поверхностей, обрабатываемых с одной установки. Примером эффективного использования данного метода является обработка с одной установки отверстий в корпусных деталях на горизонтально-расточных станках. В результате достигается высокая точность положения отверстий относительно единых технологических баз и между собой. Вследствие указанных преимуществ координатный метод получил в практике машиностроения широкое применение.

#### ***Комбинированный метод***

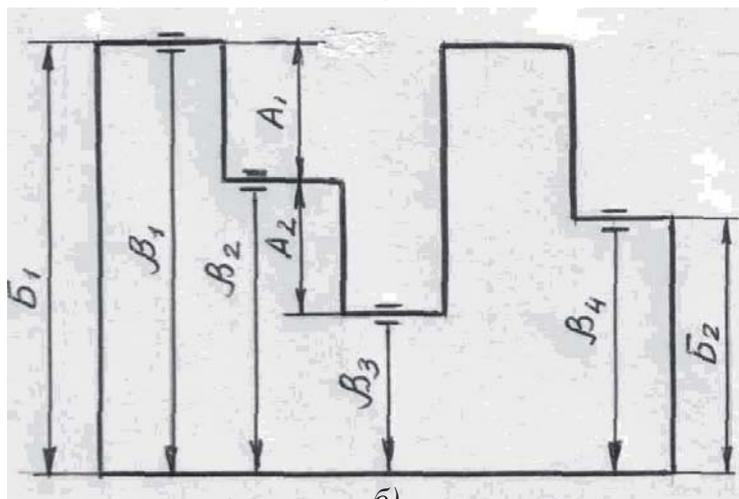
Сущность комбинированного метода заключается в одновременном использовании особенностей как цепного, так и координатного методов получения или измерения размеров деталей. При этом методе в процессе изготовления детали для получения одних размеров используют координатный метод, а для получения других – цепной (рис. 4.20). Координатный метод используют в первую очередь для получения точности относительных поворотов и расположения поверхностей – параллельности, перпендикулярности, соосности и др., когда для достижения точности требуется соблюдение принципа единства баз. Его широко используют также и для достижения точности расстояний, так как считают, что координатный метод в целом обеспечивает более высокую точность. Это объясняется тем, что не требуется выполнения переустановки, обработка выполняется с одних и тех же технологических баз, в результате чего влияние погрешности установки заготовки существенно снижается.

В свою очередь, цепной метод используют в тех случаях, когда на отдельных линейных или угловых размерах требуется обеспечить более высокую точность, а применение координатного метода не позволяет на рассматриваемом цепном звене обеспечить точность в преде-

лах заданного допуска. При этом учитывают, что погрешность установки, связанная со сменой технологических баз, сравнительно невелика,



а)



б)

Рис. 4.20. Получение линейных и угловых размеров комбинированным методом: а – при точении валика; б – при фрезеровании планки

а требуемая переустановка не представляет больших трудностей.

Использование комбинированного метода для получения на токарном станке точности линейных и угловых размеров между поверхностями ступенчатого валика схематически показано на рис. 4.20. Обработка валика осуществляется с двух установок при базировании его в центрах. Согласно приведенной схеме перпендикулярность получаемых торцевых поверхностей б, в, г относительно оси центровых гнезд, а также соосность получаемых поверхностей 1, 2, 3, 4 достигаются координатным методом от одних баз. Между тем как точность линейных

размеров  $A_1, A_2, A_3$  обеспечивается с использованием цепного метода.

На рис. 4.20, б представлена схема получения комбинированным методом размеров ступенчатой планки при обработке ее на фрезерном станке. Линейные размеры  $B_1, B_2$ , определяющие высоту соответствующей ступени, и угловые размеры  $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$ , определяющие параллельность ступеней относительно основания, получают координатным методом от основания  $a$ , выполняющего роль технологической базы. В свою очередь, линейные размеры  $A_1$  и  $A_2$ , определяющие высоту внутренних уступов, получены цепным методом соответственно в начале от полученной ранее базы  $b$ , а затем от базы  $v$ .

В зависимости от поставленной технологической задачи в практике машиностроения могут быть эффективно использованы каждый из трех рассмотренных методов получения и измерения линейных и угловых размеров деталей машин.

### **Вопросы для самопроверки**

1. Что следует понимать под размерной цепью?
2. Какие связи определяют конструкторские, технологические и измерительные размерные цепи?
3. Что следует понимать под увеличивающими и уменьшающими звеньями?
4. Какую функцию выполняет звено-компенсатор?
5. Какие размерные цепи называют пространственными?
6. Как определяется погрешность замыкающего звена для одного изделия?
7. Как определяется погрешность замыкающего звена для партии изделий?
8. Как осуществляется построение точечной диаграммы?
9. Что следует понимать под систематическими и случайными погрешностями?
10. Как рассчитать размерную цепь в номиналах?
11. Что означает решение прямой и обратной задач?
12. В чем сущность методов полной и неполной взаимозаменяемости?
13. Приведите примеры применения метода полной взаимозаменяемости.

14. В чем заключается сущность метода групповой взаимозаменяемости?
15. Назовите два расчетных условия реализации метода групповой взаимозаменяемости.
16. Назовите две разновидности метода регулировки.
17. Каким образом при расчете можно получить целое число групп компенсаторов?
18. В чем заключается сущность метода пригонки?
19. С какой целью вносится поправка в координату середины поля допуска компенсатора при методе пригонки?
20. Назовите три метода получения и измерения точности линейных и угловых размеров деталей машин.
21. В чем заключается сущность цепного метода получения и измерения точности линейных и угловых размеров деталей машин?
22. В чем заключается сущность координатного метода получения и измерения точности линейных и угловых размеров деталей машин?
23. В чем заключается сущность комбинированного метода получения и измерения точности линейных и угловых размеров деталей машин?
24. Чему равна погрешность координатного звена при цепном методе получения и измерения точности линейных и угловых размеров деталей машин?
25. Чему равна погрешность цепного звена при координатном методе получения и измерения точности линейных и угловых размеров деталей машин?

## Глава 5. ДОСТИЖЕНИЕ ТОЧНОСТИ ДЕТАЛЕЙ МАШИН ПРИ ИХ ИЗГОТОВЛЕНИИ

Различные по служебному назначению, размерам и геометрии детали машин изготавливают в соответствии с разработанным для конкретной детали технологическим процессом с использованием обособленно выбранной для данных условий заготовки. При этом выбор необходимого состава технологических переходов и объединение их в соответствующие операции для выбора требуемого технологического оборудования осуществляется путем расчета уточнений.

### 5.1. Коэффициенты уточнения и передаточные отношения технологических систем

Достижение требуемой точности детали при ее изготовлении осуществляется путем последовательной механообработки исходной заготовки на соответствующих станках. В результате прохождения заготовки через соответствующую технологическую систему происходит ее уточнение по одному или нескольким параметрам точности. Уточнение, получаемое на соответствующей технологической операции или переходе, характеризуется коэффициентом уточнения  $\varepsilon_i$ , который определяют по формуле [22]

$$\varepsilon_i = T_{i-1} / T_i \quad (5.1)$$

где  $T_{i-1}$  – допуск на размер или на любой другой рассматриваемый параметр точности детали, полученный на предшествующей технологической операции;

$T_i$  – допуск на размер, полученный на данной операции.

Следует различать уточнение расчетное  $\varepsilon_r$ , когда берется отношение допусков, и уточнение фактическое  $\varepsilon_\phi$ , когда берется отношение полей рассеяния на предшествующей  $\omega_{i-1}$  и данной  $\omega_i$  операциях:

$$\varepsilon_\phi = \frac{\omega_{i-1}}{\omega_i}.$$

Прохождение заготовки через несколько технологических систем, на каждой из которых обеспечивается определенное уточнение  $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_k$ , позволяет получить общее уточнение  $\varepsilon_o$ , которое равно произведению получаемых уточнений:

$$\varepsilon_o = \varepsilon_1 \cdot \varepsilon_2 \cdot \dots \cdot \varepsilon_k = \prod_{i=1}^{i=k} \varepsilon_i, \quad (5.2)$$

где  $k$  – количество технологических систем, проходимых заготовкой.

Отношение допуска на размер заготовки  $T_3$  к допуску на соответствующий размер детали  $T_d$  определяет требуемое уточнение  $\varepsilon_T$ , которое необходимо обеспечить в результате изготовления детали при выполнении операций технологического процесса:

$$\varepsilon_T = T_3 / T_d. \quad (5.3)$$

Таким образом, задача разработки технологического процесса изготовления детали заключается в том, чтобы так подобрать технологические операции и соответствующее оборудование  $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_k$ , прохождение которых обеспечивает достижение требуемого уточнения заготовки до нужных параметров точности детали:

$$\varepsilon_o \geq \varepsilon_T. \quad (5.4)$$

Величина, обратная коэффициенту уточнения, называется передаточным отношением технологической системы:

$$\xi_i = 1/\varepsilon_i.$$

## 5.2. Три этапа настройки технологической системы на точность

Для достижения требуемой точности деталь включают в кинематические и размерные цепи технологической системы – станок, приспособление, инструмент, деталь. При этом получаемые на детали линейные размеры и относительные повороты поверхностей представляют собой замыкающие звенья соответствующих технологических размерных цепей станка. На рис. 5.1 в качестве примера представлены технологические размерные цепи  $A_\Delta; \lambda_\Delta$  вертикально-сверлильного станка. Требуемая точность расстояния от оси отверстия до направляющей базы определяется линейной размерной цепью:

$$A_\Delta = A_1 + A_2 + A_3 + A_4.$$

В свою очередь, перпендикулярность получаемого отверстия относительно базы определяется как замыкающее звено угловой технологической размерной цепи вертикально-сверлильного станка:

$$\lambda_\Delta = \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 - \lambda_4.$$

Достижение требуемой точности замыкающего звена в линейной размерной цепи обеспечивается методом регулирования – путем перемещения заготовки на столе станка. Роль компенсатора при этом выполняет звено  $A_4$ .

В свою очередь, в угловой технологической размерной цепи звено-компенсатор отсутствует. Поэтому перпендикулярность получаемого

го отверстия относительно базы зависит от геометрической точности станка и достигается методом полной или неполной взаимозаменяемости. Отмеченная особенность характерна практически для всех металлорежущих станков. Достижение требуемой точности линейных размеров на станках обеспечивается обычно методом регулировки. Для

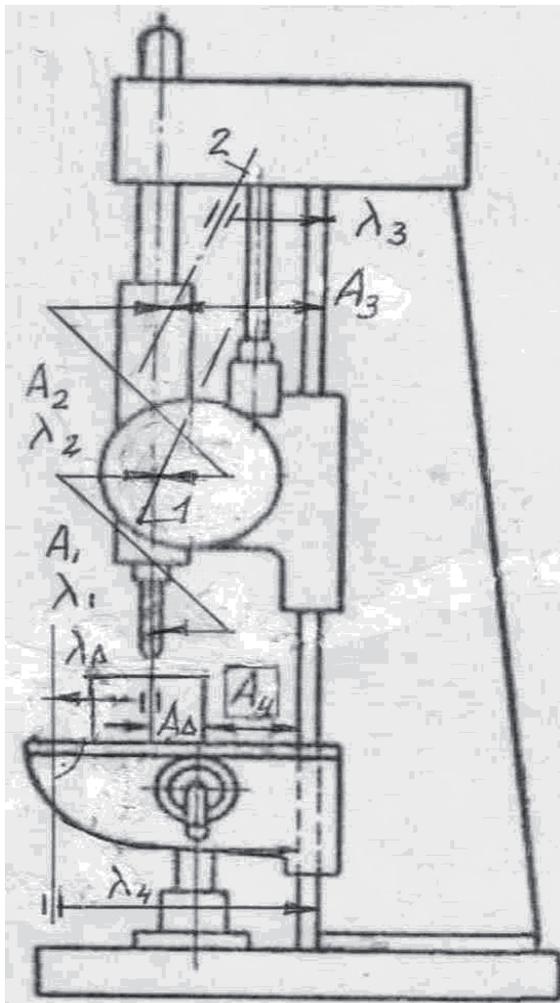


Рис. 5.1. Технологические размерные цепи вертикально-сверлильного станка: 1 – ось опорных шеек шпинделя; 2 – ось отверстия в коробке подач

точности линейных размеров.

Процесс достижения точности при изготовлении деталей на станках предусматривает выполнение трех этапов:

- 1-й этап – установка;
- 2-й этап – статическая настройка технологической системы;
- 3-й этап – динамическая настройка технологической системы.

этого в конструкции станков предусматривают звено-компенсатор в виде винта для перемещения столов, кареток или консоли, а в конструкциях приспособлений – регулируемые упоры. В результате с помощью измерительных устройств – линеек, лимбов, индикаторов и др. – на станках без особых трудностей достигают требуемую точность линейных размеров изготавливаемых деталей. Однако иная картина имеет место при достижении точности угловых размеров. Достижение точности относительных поворотов зависит от геометрической точности станка, геометрической точности его направляющих и возможность осуществления регулировки при этом практически отсутствует. Поэтому при выборе технологических баз в первую очередь следует выбирать технологические базы для достижения точности угловых размеров, а затем базы для достижения

На первом этапе (установка) деталь вводится в кинематические и размерные цепи станка и закрепляется. В результате формируется размер установки  $A_y$  с определенной погрешностью  $\omega_y$  (рис.5.2).

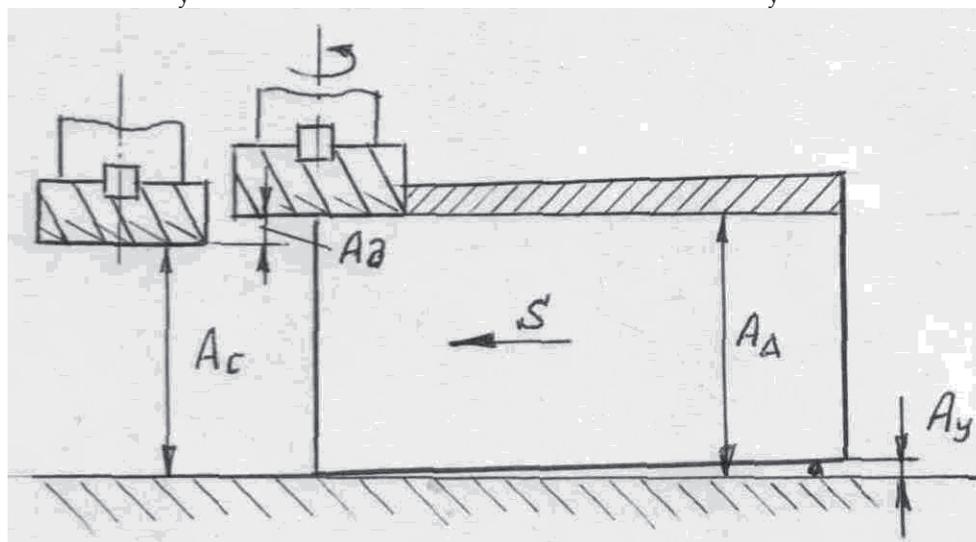


Рис. 5.2. Формирование отклонений на трех этапах настройки фрезерного станка на точность

На втором этапе (статическая настройка) рабочие органы станка без рабочих нагрузок перемещают в положение, при котором режущие кромки инструмента располагаются относительно технологических баз детали (относительно баз станка) на требуемый размер  $A_c$ , который называется размером статической настройки. Возникающие на этом этапе отклонения приводят к формированию погрешности статической настройки  $\omega_c$ .

На третьем этапе (динамическая настройка) происходит непосредственно процесс резания, при котором возникают усилия резания, температурные деформации, вибрации, износ инструмента и прочее.

В результате этого возникают отклонения инструмента и детали относительно первоначально заданного положения, что означает формирование размера динамической настройки  $A_d$ , изменения которого приводят к образованию погрешности динамической настройки  $\omega_d$ .

В итоге получаемый на детали размер  $A_\Delta$  представляет собой алгебраическую сумму трех размеров:

$$A_\Delta = A_y + A_c + A_d.$$

При этом отклонение  $\Delta_\Delta$  получаемого размера  $A_\Delta$  для одной детали представляет собой алгебраическую сумму отклонений, полученных на каждом из этапов настройки станка:

$$\Delta_\Delta = \Delta_y + \Delta_c + \Delta_d,$$

а погрешность размера в партии деталей  $\omega_{\Delta}$  определяется арифметической суммой погрешностей:

$$\omega_{\Delta} = \omega_y + \omega_c + \omega_d.$$

### 5.3. Погрешность установки и пути ее уменьшения

Погрешность установки формируется на технологических базах и представляет собой отклонения технологических баз детали относительно рабочих поверхностей приспособления или стола станка, на которые она устанавливается. В общем случае погрешность установки представляет собой вектор  $\omega_y$ , определяющий положение технологических баз устанавливаемой детали  $(X, Y, Z)$  относительно координатной системы  $(X, Y, Z)$  рабочих поверхностей приспособления или стола станка:

$$\omega_y = (a_y, b_y, c_y, \lambda_y, \beta_y, \gamma_y), \quad (5.5)$$

где  $a_y, b_y, c_y$  – линейные составляющие;

$c_y, \lambda_y, \beta_y, \gamma$  – угловые составляющие.

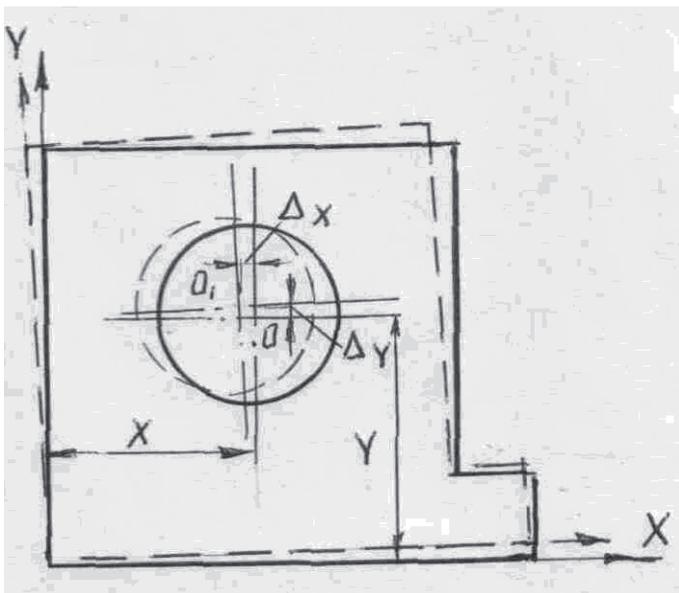


Рис. 5.3. Отклонения центра растачиваемого отверстия, обусловленные погрешностью установки заготовки на столе станка

отверстия  $\Delta_x$  и  $\Delta_y$ , обусловленные погрешностью установки заготовки на столе станка. Их можно рассчитать согласно выражению:

$$\begin{vmatrix} \Delta_x \\ \Delta_y \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} a_y \\ b_y \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} 0 & -\gamma_y \\ \gamma_y & 0 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} X \\ Y \end{vmatrix}, \quad (5.6)$$

где  $a_y, b_y, \gamma_y$  – линейные и угловые составляющие погрешности установки;

Отклонения положения различных поверхностей заготовки, обусловленные погрешностью ее установки на станке, представляют собой приведенную погрешность установки  $\omega_{yp}$ , которая зависит от составляющих вектора  $\omega_y$  и координат, определяющих положение рассматриваемой поверхности относительно технологических баз детали.

В качестве примера на рис. 5.3 показаны отклонения центра растачиваемого

$X, Y$  – координаты, определяющие положение центра отверстия, относительно технологических баз.

Так, например, при составляющих погрешности установки  $a_y = 0,03$  мм,  $b_y = 0,05$  мм,  $\gamma_y = 0,02/100$  и значении координат  $X = 200$ ,  $Y = 250$  мм получим:

$$\Delta_x = 0,03 - 0,02/100 \cdot 250 = 0,02 \text{ мм};$$

$$\Delta_y = 0,05 + 0,03/100 \cdot 200 = 0,11 \text{ мм}.$$

Знак минус при параметре поворота  $\gamma_y$  показывает, что при положительном вращении вокруг оси  $Z$  (против часовой стрелки) смещение по оси  $X$  происходит в отрицательном направлении.

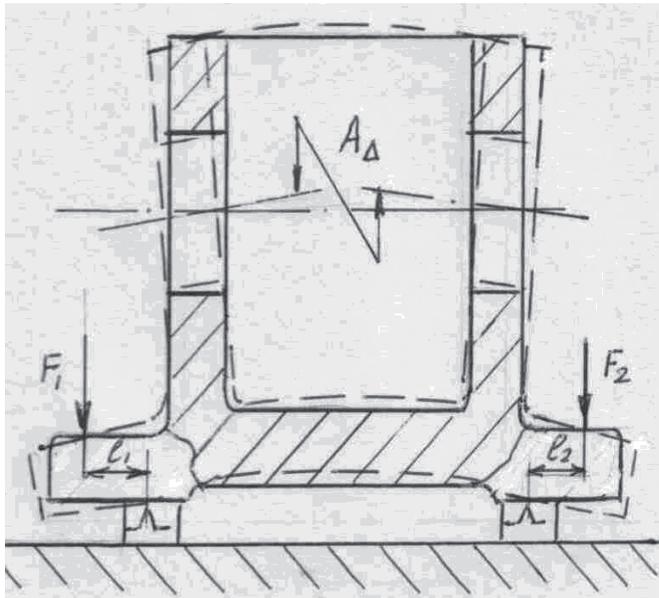
Основными причинами формирования погрешности установки являются:

1. Неправильный выбор технологических баз, что имеет особо важное значение на первых операциях.
2. Неправильное приложение силового замыкания, что может привести к неорганизованной смене баз или к недопустимым деформациям заготовки в процессе закрепления.
3. Отклонения параметров точности технологических баз, включая отклонения размеров, относительных поворотов и отклонения геометрической формы базовых поверхностей заготовки.
4. Погрешность геометрической точности рабочих поверхностей приспособления или станка.
5. Неправильное использование правила шести точек.
6. Ошибки, допущенные при выборе измерительных баз и средств измерения.
7. Неорганизованная смена баз, возникающая в процессе установки.
8. Недостаточная квалификация и ошибки рабочего.

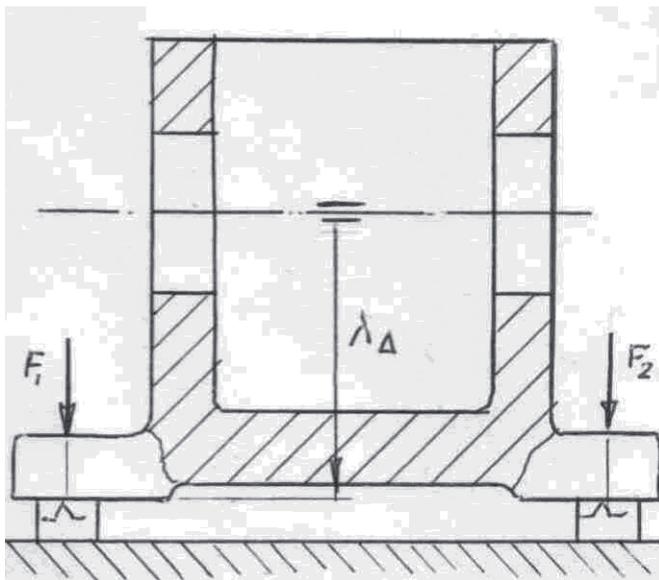
При выборе технологических баз необходимо соблюдать принцип геометрического соответствия той или иной поверхности, используемой для ориентации и закрепления заготовки. В качестве установочной базы следует выбирать поверхность наибольшей площади, в качестве направляющей базы – поверхность наибольшей протяженности, а в качестве опорной базы – поверхность сколь угодно малой площади.

Направление силового замыкания необходимо ориентировать на опорные элементы установочной базы, имеющие значительно боль-

шую жесткость. Точки приложения силового замыкания необходимо выбирать над опорными элементами или в точках, симметрично расположенных между опорными элементами. В качестве примера на рис. 5.4 показаны две схемы приложения силового замыкания при закреплении корпусной детали на операции расточки отверстий.



а)



б)

Рис. 5.4. Две схемы приложения силового замыкания при закреплении корпуса на операции расточки главных отверстий

В первом случае (рис. 5.4, а) силы закрепления смещены на расстояния  $l_1$  и  $l_2$  относительно опорных элементов. В результате возникают и изгибающие моменты:

$$M_1 = l_1 \cdot F_1 \text{ и } M_2 = l_2 \cdot F_2,$$

под действием которых корпус деформируется (изгибается). Обработка корпуса в деформированном состоянии приводит к тому, что после расточки и снятия усилий закрепления отклонения от соосности  $A\Delta$  и параллельности  $\lambda\Delta$  полученных отверстий превышают допустимые предельные значения. При второй схеме (рис. 5.4, б) приложения силового замыкания изгибающие моменты отсутствуют ( $M_1 = M_2 = 0$ ) и деформации корпуса не возникают.

Опорные элементы двойной опорной и опорной базы – базовые штыри цельные и срезанные – в большинстве случаев применяют для правильного ориентирования заготовки и не имеют достаточной жест-

кости. Поэтому приложение в их направлении силового замыкания может привести к их деформации и формированию дополнительной погрешности установки.

Погрешность установки в значительной степени зависит от точности формы базовой поверхности. На финишных операциях и на операциях, где требуется достижение повышенной точности, технологические базы подвергают отделке шлифованием. С этой целью у корпусных деталей шлифуют плоские поверхности установочной, направляющей и опорной базовых поверхностей. У ответственных валов перед фрезерованием шлицевых или шпоночных пазов шлифуют опорные ступени, которые затем используют в качестве технологических баз. Перед отделкой валов шлифованием доводят с помощью конических шлифовальных кругов базовые центровые гнезда.

Для уменьшения влияния погрешности геометрической формы технологических баз установку заготовки выполняют не по всей площади базовой поверхности, а на специально создаваемых опорных элементах (рис. 5.5). При базировании заготовок по черным поверхностям применяют опорные элементы со сферической головкой (рис. 5.5, а) или с насеченной головкой остроугольным профилем (рис. 5.5, б). Для базирования заготовок по обработанным, чистым поверхностям применяют опорные элементы с плоской головкой (рис. 5.5, в) или опорные пластины (рис. 5.5, г).

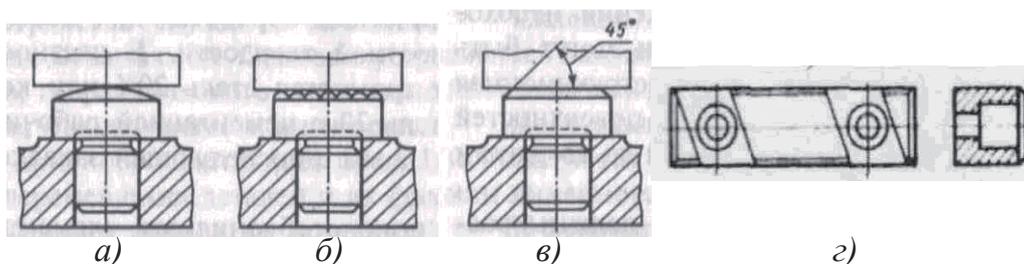


Рис. 5.5. Опорные элементы приспособлений, применяемые для установки заготовок

Точная установка заготовки достигается при правильной ее ориентации в главной координатной системе станка ( $X, Y, Z$ ), связанной с ее направляющими, которые определяют траекторию перемещения рабочих органов станка. На рис. 5.6 показана схема выставки обрабатываемой станины в координатной системе ( $X, Y, Z$ ) плоскошлифовального станка на операции шлифования направляющих. Припуск,

оставляемый на шлифование направляющих, составляет 0,3 – 0,4 мм, что на порядок меньше погрешности установки, которая имеет место

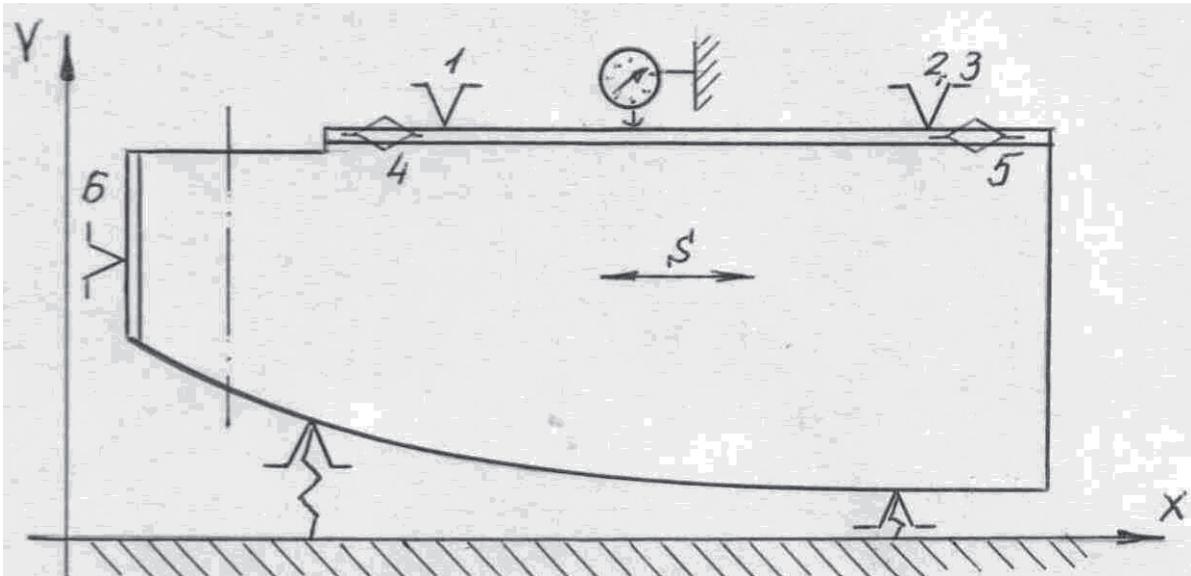


Рис. 5.6. Схема выставки обрабатываемой станины в координатной системе продольного плоскошлифовального станка

при установке станины на постоянные опоры ( $\omega_y = 4 \dots 7$  мм). Поэтому станину устанавливают на клиновые опоры, регулировкой которых достигают необходимую ориентацию станины, при которой параллельность обрабатываемых поверхностей относительно направления перемещения рабочих органов станка не превышает 0,03...0,05 мм на длине направляющих. Для этого стол с установленной станиной перемещают в осевом направлении, а отклонения от параллельности фиксируют с помощью устанавливаемого индикатора. Это означает, что базирование осуществляется по обрабатываемой поверхности направляющих, как это показано на рис. 5.6 схемой постановки теоретических опорных точек.

Так как доступ к направляющим станины станка затруднен, а оценить положение относительно направляющих возможно только путем перемещении ориентируемой заготовки, то в ряде случаев с целью упрощения заготовку выставляют относительно рабочей поверхности стола и расположенных на ней пазов. Для этого могут быть использованы индикатор на стойке или штанген-рейсмус, а для регулирования положения заготовки – винтовые упоры. Штанген-рейсмус применяют также для выставки заготовок на столе станка по рискам предварительно сделанной разметки.

Для нежестких деталей, у которых в процессе резания возникают

значительные деформации, дополнительно устанавливают регулируемые, подводные опоры (рис. 5.7, *a*), которые фиксируются в требуе-

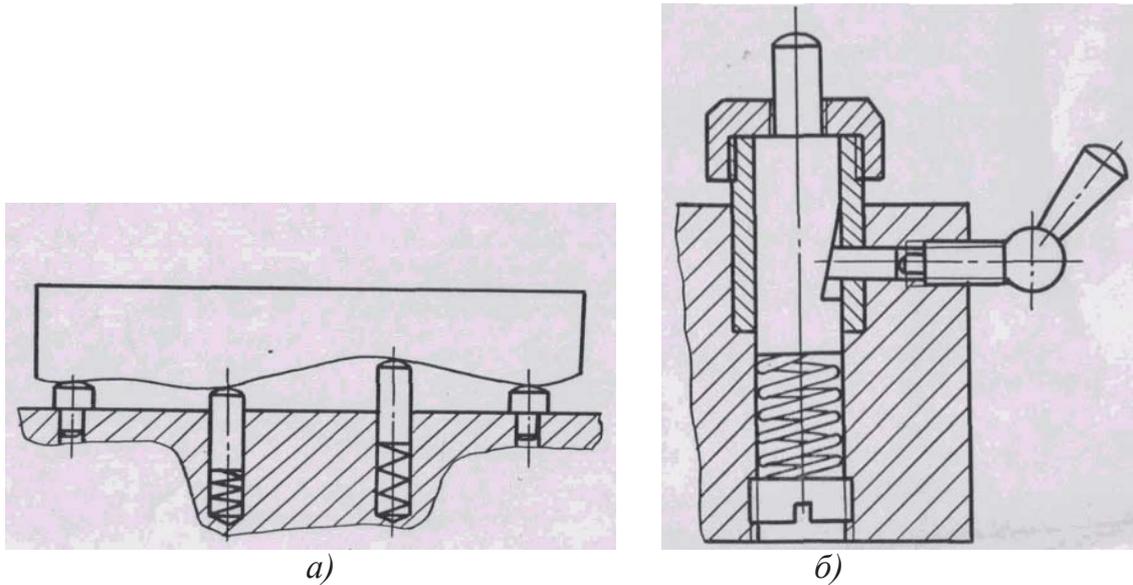


Рис. 5.7. Установка заготовок с использованием подводных опор: *a* – схема расположения подводных опор; *б* – схема конструкции подводимой опоры

мом положении при достижении контакта с базовой поверхностью детали. Схема конструкции подводимой опоры приведена на рис. (рис. 5.7, *б*).

В тех случаях, когда размеры поверхностей детали не отвечают требованиям геометрии выбираемых баз (малая площадь, малая длина), на заготовке предусматривают специальные технологические базы в виде приливов, бабышек и т.п., которые после окончания обработки при необходимости срезают на последующих операциях.

Для уменьшения влияния погрешности относительного поворота базовых поверхностей заготовки на точность ее установки опорные элементы направляющей и опорных баз целесообразно устанавливать на уровне средней плоскости (рис. 5.8, *б*). В противном случае имеет место смещение заготовки (рис. 5.8, *a*), величина которого может составить

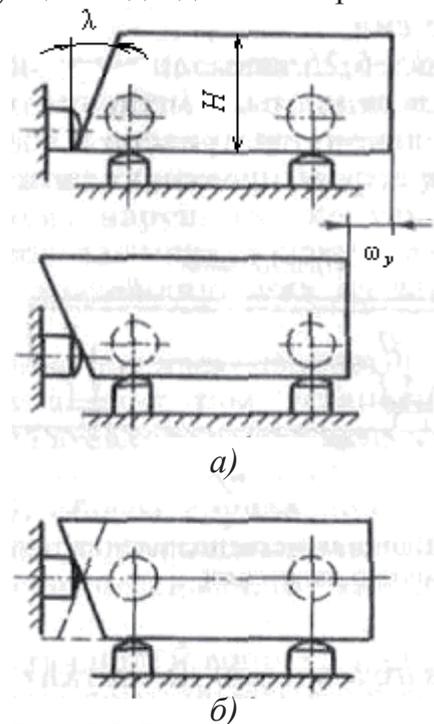


Рис. 5.8. Влияние относительного поворота базовых поверхностей заготовки на точность ее установки: *a* – наличие погрешности; *б* – отсутствие погрешности

$$\omega_y = \lambda \cdot H,$$

где  $\lambda$  – отклонение от перпендикулярности базовой поверхности относительно установочной базы, например 0,3/200;

$H$  – высота базовой поверхности, мм.

Погрешность установки и ее влияние на точность обработки можно значительно уменьшить при соблюдении принципа единства баз. Большинство поверхностей детали необходимо стремиться обработать с одних и тех же технологических баз. На точность относительного положения поверхностей детали, полученных в результате обработки с одной установки, погрешность установки не оказывает влияния. Это наглядно показано на примере фрезерования нескольких поверхностей плитки набором фрез (см. рис. 3.13).

Это важное преимущество эффективно используют на многоцелевых станках, когда корпусную деталь обрабатывают со всех сторон с одной установки. Наличие на многоцелевых станках спутников (палет), на которые устанавливают обрабатываемые заготовки, позволяет осуществлять обработку заготовки с одной установки не только на одном станке, но и на нескольких других станках.

Наиболее полное использование принципа единства баз означает использование в качестве технологических баз не только одних и тех же поверхностей, но также одних и тех же участков этих поверхностей.

На формирование погрешности установки при изготовлении партии деталей оказывает влияние также разброс сил закрепления, которые порождают различные контактные деформации в опорных точках. Это находит особенно сильное проявление при выполнении точной обработки, когда закрепление выполняется вручную. Поэтому в общем случае погрешность установки определяется как совокупность погрешностей:

$$\omega_y = \omega_6 + \omega_3,$$

где  $\omega_6$  – погрешность базирования, обусловленная отклонениями геометрической точности баз и неправильным расположением опорных поверхностей;

$\omega_3$  – погрешность закрепления, обусловленная неправильным расположением силового замыкания и возникающими при закреплении деформациями.

Отклонение поверхности устанавливаемой детали от требуемого положения в направлении нормали к соответствующей базе  $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$  является отклонением размера, обусловленным погрешностью установки. Оно определяется как приведенная погрешность установки и называется отклонением размера установки. Это отклонение зависит как от составляющих вектора  $\omega_y$ , так и от положения рассматриваемой поверхности относительно баз детали.

Для трех типовых схем базирования, представленных на рис. 5.9, отклонения размера установки, формируемые по нормали к каждой из трех баз, могут быть рассчитаны по приведенным ниже матричным формулам [22].

Для базирования по трем плоскостям (рис. 5.9, а) формула имеет вид

$$\begin{vmatrix} \varepsilon_x^{(оп)} \\ \varepsilon_y^{(нап)} \\ \varepsilon_z^{(уст)} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} a_y^{(оп)} \\ b_y^{(нап)} \\ c_y^{(уст)} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} 0 & z & y \\ z & 0 & x \\ y & x & 0 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} \lambda_y^{(уст)} \\ \beta_y^{(уст)} \\ \gamma_y^{(нап)} \end{vmatrix}, \quad (5.7)$$

где  $x, y, z$  – координаты краевых точек рассматриваемых поверхностей.

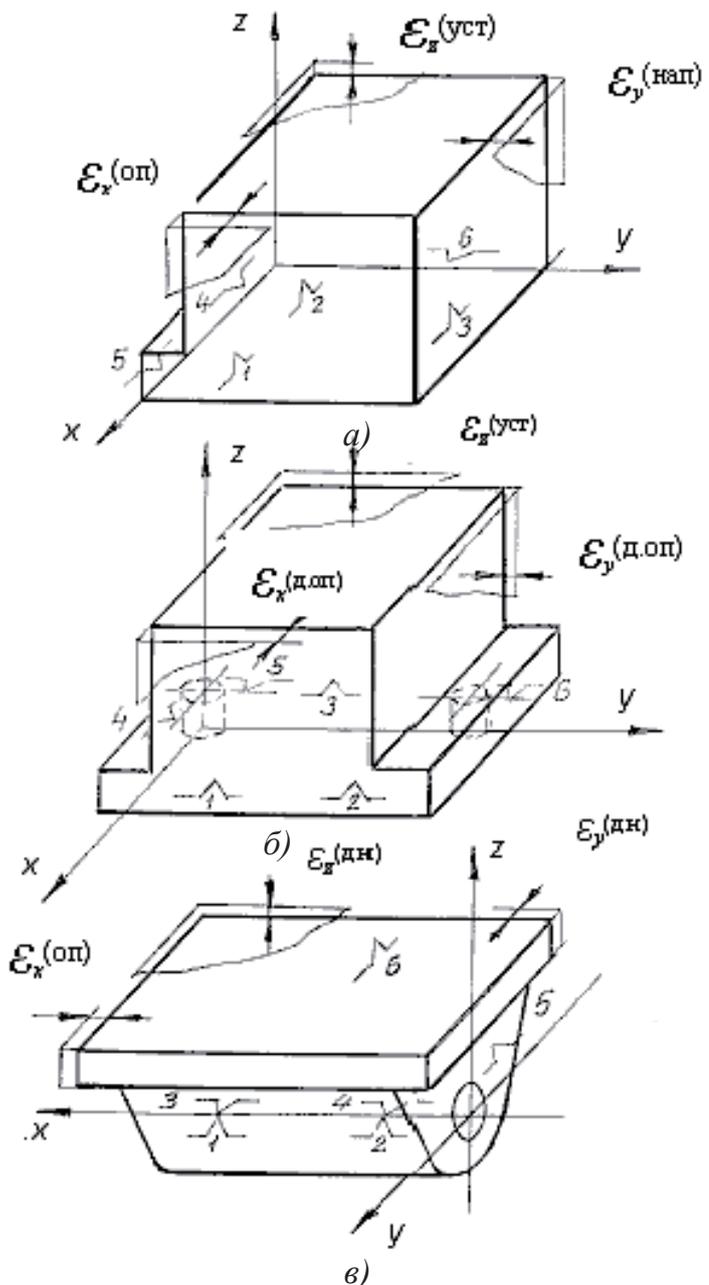


Рис. 5.9. Отклонения размеров, обусловленные погрешностью установки детали для трех типовых схем базирования: а – базирование по трем плоскостям; б – базирование с использованием двойной опорной базы; в – базирование с использованием двойной направляющей базы

Индексы на составляющих вектора  $\omega_y$  обозначают базы, на которых формируются соответствующие параметры погрешности установки: (уст) – установочная; (нап) – направляющая; (оп) – опорная.

При базировании детали с использованием двойной опорной базы (рис. 5,9, б) погрешность установки  $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$  в направлении нормали к трем базам рассчитывают по формуле

$$\begin{vmatrix} \varepsilon_x^{(д.оп)} \\ \varepsilon_y^{(д.оп)} \\ \varepsilon_z^{(уст)} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} a_y^{(д.оп)} \\ b_y^{(д.оп)} \\ c_y^{(уст)} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} 0 & z & y \\ z & 0 & x \\ y & x & 0 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} \lambda_y^{(уст)} \\ \beta_y^{(уст)} \\ \gamma_y^{(оп)} \end{vmatrix}, \quad (5.8)$$

где составляющие вектора  $\omega_y$  имеют индексы соответствующих баз: (уст) – установочная; (д.оп) – двойная опорная; (оп) – опорная.

При базировании детали по двум главным отверстиям на конусах или на оправке с использованием двойной направляющей базы (рис. 5.9, в) погрешность установки  $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$  в направлении нормали к трем базам определяют по формуле

$$\begin{vmatrix} \varepsilon_x^{(оп)} \\ \varepsilon_y^{(д.н)} \\ \varepsilon_z^{(д.н)} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} a_y^{(оп)} \\ b_y^{(д.н)} \\ c_y^{(д.н)} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} 0 & z & y \\ z & 0 & x \\ y & x & 0 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} \lambda_y^{(оп)} \\ \beta_y^{(д.н)} \\ \gamma_y^{(д.н)} \end{vmatrix}, \quad (5.9)$$

где индексы на составляющих вектора  $\omega_y$  определяют базы, на которых формируются соответствующие погрешности: (д.н) – двойная направляющая база, (оп) – опорная база.

#### 5.4. Статическая настройка технологической системы

Статическую настройку станка в общем случае выполняют в три этапа.

На первом этапе ориентируют и устанавливают на станке с требуемой точностью приспособление, обрабатываемую заготовку и инструмент.

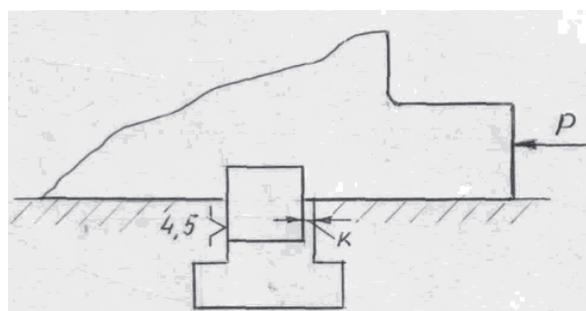
На втором этапе путем перемещения рабочих органов станка добиваются требуемой точности положения режущих кромок инструмента относительно технологических баз детали или приспособления станка. На этом этапе формируются размеры статической настройки  $A_c, B_c, \Gamma_c, \lambda_c, \beta_c, \gamma_c$ , которые в общем случае образуют вектор  $k_c = (A_c, B_c, \Gamma_c, \lambda_c, \beta_c, \gamma_c)$ , определяющий положение координатной системы исполнительных поверхностей инструмента относительно технологических баз детали:  $(x_u, y_u, z_u) \Rightarrow (x_T, y_T, z_T)$ .

На третьем этапе после фиксации в требуемом положении приспособления, заготовки и инструмента выполняют проверку точности статической настройки.

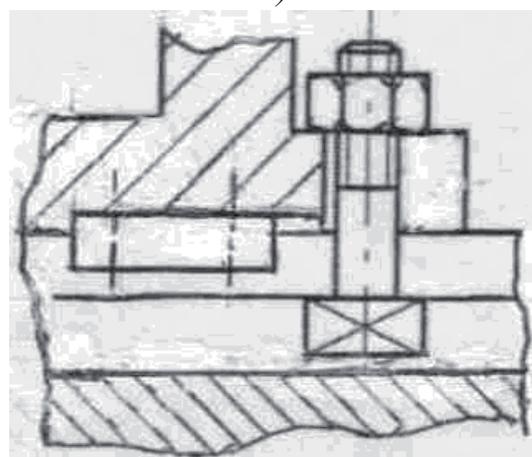
Причинами формирования погрешности статической настройки технологической системы являются: неправильный выбор технологических баз; неправильный выбор измерительных баз и средств измерения; неточность средств и методов выполнения статической настройки; неправильная установка калибрующих кромок инструмента относительно технологических баз детали или рабочих поверхностей станка; неправильная установка и закрепление приспособления на станке; недостаточная геометрическая точность самого станка; недостаточная квалификация рабочего.

Для повышения точности статической настройки системы на каждом из рассмотренных выше этапов применяют определенные технологические решения.

Приспособление на столе станка обычно базируется по трем плоскостям (рис. 5.10). Приспособление устанавливают на рабочую поверхность стола станка, при этом основание приспособления выполняет роль установочной базы. Две шпонки, расположенные на основании, выполняют роль направляющей базы. Они входят в Т-образные пазы, расположенные на рабочей поверхности стола и ориентируют приспособление параллельно направляющим, то есть параллельно направлению перемещения стола на рабочей подаче. Для достижения правильной установки приспособления (см. рис. 5.10, а) необходимо силовым замыканием  $P$  обеспечить определенность его базирования по одной стороне Т-образного паза. При этом с другой стороны направляющей шпонки должен быть зазор  $K$ .



а)



б)

Рис. 5.10. Установка приспособления на столе станка: а – базирование приспособления по трем плоскостям; б – схема закрепления приспособления

Приспособления на столе станка закрепляют с помощью Т-образных болтов или Т-образных сухарей, которые заводят в пазы, расположенные на рабочей поверхности стола станка (см. рис. 5.10, б).

Для точной установки приспособлений и контроля их положения на приспособлении предусматриваются специальные измерительные базы. На столах станков предусматривают центральные базовые отверстия и продольные Т-образные пазы. На сменных столах-спутниках, применяемых на многоцелевых станках, с этой целью предусматривают сетку пазов или сетку базовых отверстий. При этом две поверхности по краям спутника, образующие координатный угол, выполняют роль измерительных баз, используемых для точной установки приспособлений и заготовок.

Для точной выставки на размер  $A_c$  режущего инструмента применяют мерные плитки, специальные габариты (эталоны), которые упрощают статическую настройку, повышают производительность и точность статической настройки. На рис. 5.11 показаны примеры применения мерных плиток для выставки на требуемый размер статической

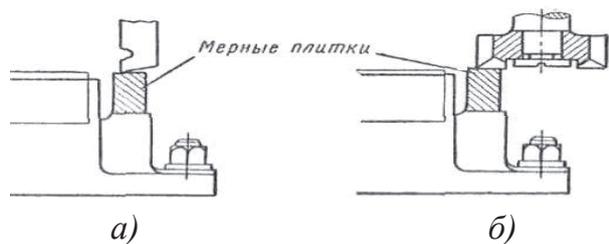


Рис. 5.11. Статическая настройка станков с применением мерных плиток: а – строгального; б – фрезерного

настройки режущих инструментов на строгальных и фрезерных станках. На приспособлениях со стороны подвода режущего инструмента предусматривают измерительные базы, на которые устанавливают мерные плитки требуемого размера. Режущий инструмент – строгальный резец

(рис. 5.11, а) или фрезу (рис. 5.11, б) – доводят до касания с плиткой, а затем фиксируют достигнутое положение рабочих органов станка. Для определения момента контакта между плиткой и инструментом могут устанавливать щуп или тонкую папиросную бумагу. После этого мерную плитку снимают и на настроенном станке выполняют обработку партии заготовок. При необходимости настройки станка на получение других размеров используют другие мерные плитки соответствующей высоты. Мерные плитки обычно применяют для настройки станков на изготовление деталей простых форм. Настройку станков для деталей сложной геометрии осуществляют с использованием габаритов.

Габарит представляет собой плоский калибр толщиной 10...15 мм, на рабочей поверхности которого расположены стальные закаленные пластины. Контур рабочей поверхности габарита соответствует геометрии обрабатываемой поверхности, например контуру направляющих станины станка. Габарит устанавливают на краю стола перед обрабатываемой заготовкой. Режущий инструмент, фрезу или строгальный резец подводят до касания к соответствующей грани габарита, фиксируют достигнутый размер статической настройки, а затем выполняют обработку соответствующей поверхности заготовки.

Для исключения возможности повреждения режущих кромок инструмента и рабочей поверхности габарита в момент касания между ними устанавливают тонкую папиросную бумагу. Точность касания фиксируют по моменту закусывания бумаги. Это позволяет обеспечить точность статической настройки станка в пределах 0,05...0,1 мм.

На токарных станках и токарных полуавтоматах возможна статическая настройка с использованием изготовленной детали или эталонной детали.

На станках с ЧПУ и обрабатывающих центрах траектория статической настройки задается в управляющей программе. Задача рабочего заключается в согласовании нуля программы с нулевыми точками детали, приспособления и станка.

Для повышения точности статической настройки на станках предусматривают различные по конструкции измерительные системы отсчета перемещений – нониусы, лимбы, встроенные индикаторы и др.

Для достижения точности статической настройки выполняют также промежуточные пробные проходы (метод пробных проходов). Резание выполняют на коротком участке, а затем выполняют измерения обработанной поверхности и при необходимости вводят коррекцию с помощью системы отсчета станка.

### **5.5. Образование размера динамической настройки при возникновении упругих перемещений в технологической системе**

Размер динамической настройки  $A_d$ , возникающий в момент врезания и действующий на протяжении процесса резания, представляет собой суммарные отклонения инструмента и обрабатываемой заготовки от заданного при статической настройке положения. Эти отклонения возникают в результате совокупного действия ряда факторов, основными из которых являются:

- упругие перемещения в технологической системе, порождаемые действием сил резания и их моментов;
- тепловые деформации заготовки, деталей станка, приспособления;
- вибрации, возникающие в процессе обработки;
- размерный износ и затупление режущего инструмента.

Изменения размера динамической настройки в процессе резания от  $A_{\text{д}}^{\text{нб}}$  до  $A_{\text{д}}^{\text{нм}}$  приводит к формированию погрешности размера динамической настройки  $\omega_{\text{д}} = A_{\text{д}}^{\text{нб}} - A_{\text{д}}^{\text{нм}}$ . Доминирующим фактором в образовании размера динамической настройки  $A_{\text{д}}$  являются упругие перемещения  $Y_{\Delta}$ , возникающие в технологической системе  $A_{\text{д}} \equiv Y_{\Delta}$ . Они определяются действием силы резания и жесткостью технологической системы.

Под *жесткостью технологической системы* понимают способность системы противостоять возникающим упругим перемещениям в заданном направлении под действием приложенной силы [5, 12]. Она определяется по формуле

$$j = \frac{\Delta P}{\Delta y},$$

где  $\Delta P$  – приращение силы, направленной в направлении измеряемого перемещения (н);

$\Delta y$  – упругие перемещения, обусловленные действием приложенной силы (мм).

Величина  $\xi$ , обратная жесткости, называется податливостью:

$$\xi = 1/j \text{ (мм / н)}.$$

Податливость определяет способность узла или системы деформироваться под действием приложенной нагрузки. Составляющими звеньями технологической цепи, определяющей размер, получаемый на обрабатываемой заготовке, являются детали станка, приспособления, режущий инструмент. Поэтому податливость технологической системы представляет собой сумму

$$\xi = \xi_1 + \xi_2 + \dots + \xi_{m-1} = \sum_{i=1}^{m-1} \xi_i,$$

где  $\xi_i$  – податливость деталей и узлов, образующих технологическую размерную цепь станка.

Схема измерения жесткости шпинделя токарного станка представлена на рис. 5.12. К шпинделю станка в направлении образования радиального размера прикладывают нагрузку  $P$ , величину которой постепенно увеличивают. Одновременно с помощью индикато-

ра измеряют возникающие в этом направлении упругие перемещения  $\Delta_y$ . На основе полученных данных нагружения шпинделя строят кривую жесткости (рис. 5.13). На построенной кривой ветвь 1 определяет упругие перемещения шпинделя при его нагружении, а ветвь 2 – упругие перемещения при постепенном снятии нагрузки. Площадь петли, образованной между двумя ветвями, определяет работу, которая затрачивается на преодоление сил трения в стыках и на деформацию деталей системы. Остаточная, незначительная по величине упругая деформация  $\Delta_y$  обычно снимается при появлении небольших вибраций.

Исследования показывают, что кривая жесткости имеет пологий характер. В начале нагружения упругие перемещения интенсивно растут, а затем интенсивность их роста с увеличением нагрузки снижается. Это объясняется механикой формирования упругих перемещений. На на-

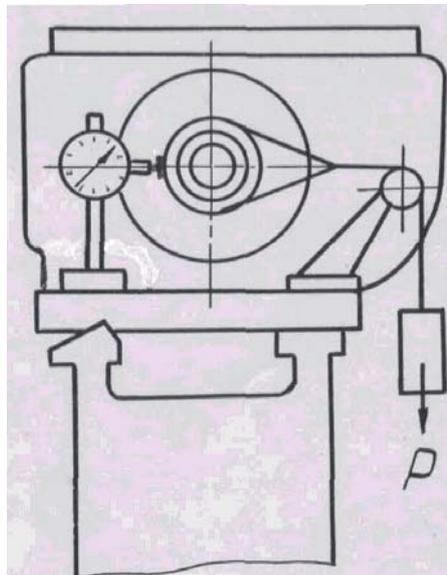


Рис. 5.12. Схема измерения жесткости шпинделя токарного станка

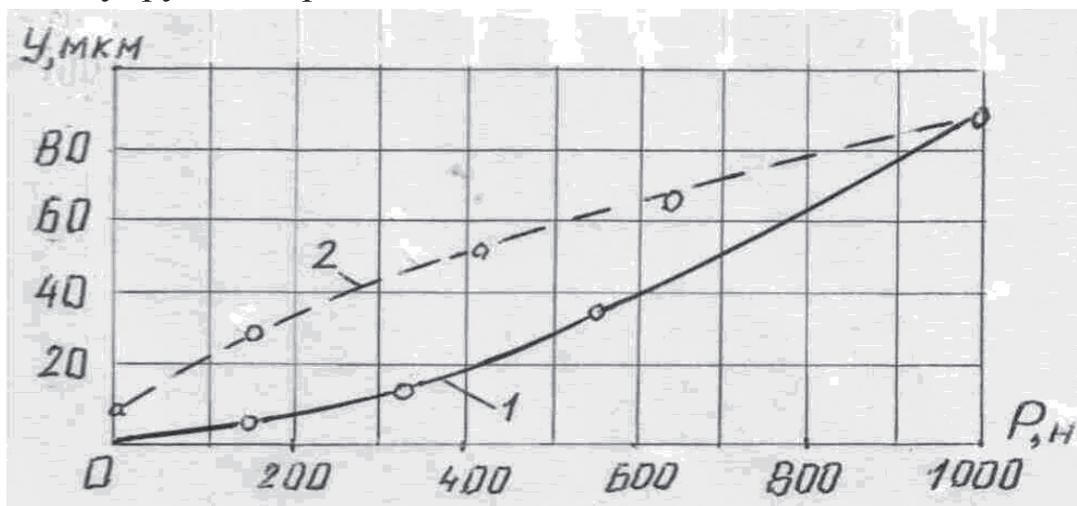


Рис. 5.13. График зависимости величины упругого перемещения от прилагаемой нагрузки

чальном этапе под действием нагрузки детали в подвижных соединениях сближаются, в результате этого зазоры в стыках уменьшаются и практически выбираются до нулевого значения. При дальнейшем нагружении возникают контактные деформации в стыках, а затем и собственные деформации деталей. Это требует значительно больших уси-

лий, однако величина перемещений при этом меньше. Таким образом, величина упругого перемещения в подвижном соединении  $\Delta_y$  определяется как сумма выбираемых зазоров  $\Delta_{y_3}$ , контактных  $\Delta_{y_k}$  и собственных деформаций  $\Delta_{y_c}$  деталей образующих соединение:

$$\Delta_y = \Delta_{y_3} + \Delta_{y_k} + \Delta_{y_c}.$$

Во всей технологической системе имеет место более сложная картина трансформации передаваемой нагрузки и возникающих пространственных упругих перемещений присоединяемых и базовых деталей. Упругие перемещения на конечных звеньях – на заготовке и режущем инструменте – возникают как в результате собственных деформаций деталей и узлов системы, так и в результате пространственных смещений и поворотов их базовых деталей, влияние которых зависит от их положения в конструкции станка.

Жесткость технологической системы по длине обработки является величиной переменной. В соответствии с этим изменяется и величина упругих перемещений по координате перемещения режущего инструмента.

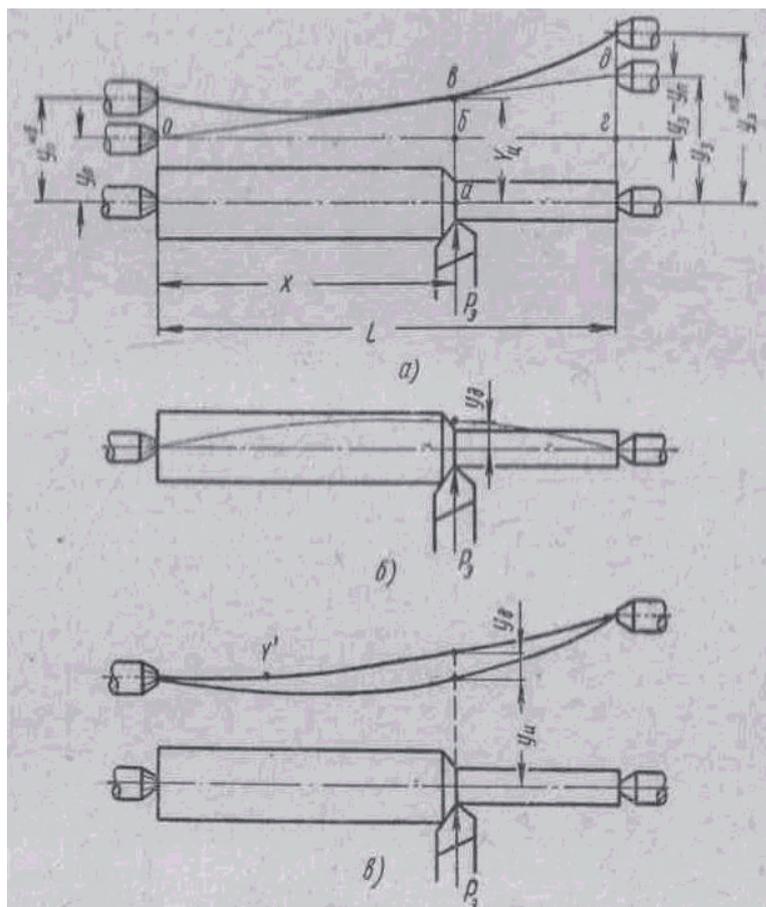


Рис. 5.14. Изменение упругих перемещений по координате перемещения резца, обусловленное переменной жесткостью токарного станка

Это наглядно показано на примере обработки валика на токарном станке (рис. 5.14). Величина упругого перемещения на замыкающем звене токарного станка  $Y_\Delta$  определяется путем алгебраического суммирования:

- упругих перемещений переднего  $Y_\Pi$  и заднего  $Y_3$  центров, определяющих смещение линии  $Y_\Pi$  центров;
- упругих перемещений детали  $Y_D$ ;
- упругих перемещений суппорта  $Y_C$ ;
- упругих перемещений режущего инструмента  $Y_I$ ;

$$Y_{\Delta} = Y_{\Pi} + Y_{\text{д}} + Y_{\text{с}} + Y_{\text{и}}.$$

Жесткость переднего центра выше, чем у заднего, а следовательно

$$Y_{\Pi} < Y_{\text{з}}.$$

В процессе точения нагрузка на два центра меняется в соответствии с координатой  $x$  положения резца (см. рис. 5.14, *а*). Наибольшая нагрузка на задний центр имеет место в начале точения при координате  $x = L$ . В результате на заднем центре возникают наибольшие упругие перемещения  $Y_{\text{з}}^{\text{нб}}$ . В свою очередь, наибольшие упругие перемещения на переднем центре  $Y_{\Pi}^{\text{нб}}$  возникают в конце точения при координате  $x \Rightarrow 0$ . Упругие перемещения в различных точках линии центров  $Y_{\Pi} = f(x)$  как функцию координаты  $x$  определяют из подобия треугольников Овб и Огд:

$$Y_{\Pi}(x) = Y_{\Pi} + x/L (Y_{\Pi} - Y_{\text{з}}).$$

Таким образом, упругие перемещения в различных точках линии центров меняются в результате изменения жесткости системы по координате  $x$  перемещения резца. С учетом переменной нагрузки, действующей на задний и передний центры, эти перемещения можно описать параболой, представленной на рис. 5.14, *а*:

$$Y_{\Pi} = \left(1 - \frac{x}{L}\right)^2 \cdot \frac{P}{j_{\Pi}} + \left(\frac{x}{L}\right)^2 \cdot \frac{P}{j_{\text{з}}},$$

где  $j_{\Pi}$  и  $j_{\text{з}}$  – соответственно жесткость в переднем и на заднем центрах.

Упругие перемещения обрабатываемого валика  $Y_{\text{д}}$  также меняются по координате  $x$  перемещения резца, что обусловлено его переменной жесткостью  $j_{\text{д}} = f(x)$  (см. рис. 5.14, *б*). В соответствии с этим при обработке нежестких валов на детали образуется погрешность геометрической формы в виде бочкообразности, а при обработке жестких валов, когда жесткость детали  $j_{\text{д}}$  выше жесткости центров  $j_{\Pi}$  и  $j_{\text{з}}$ , на детали образуется погрешность формы в виде корсетности.

Образование на замыкающем звене суммарных упругих перемещений, обусловленных перемещениями базовых центров и прогибом обрабатываемой заготовки, показано на рис. 5.14, *в*.

Таким образом, упругие перемещения на замыкающем звене  $Y_{\Delta} = f(x)$  с учетом изменения координаты  $x$  приложения нагрузки и переменной жесткости технологической системы по координате  $x$  составят:

$$Y_{\Delta} = \left(1 - \frac{x}{L}\right)^2 \cdot \frac{P}{j_{\Pi}} + \left(\frac{x}{L}\right)^2 \cdot \frac{P}{j_{\text{з}}} + \frac{P}{j_{\text{д}}} + \frac{P \cdot \alpha}{j_{\text{и}}} + \frac{P \cdot \beta}{j_{\text{с}}},$$

где  $j_{\text{и}}$ ,  $j_{\text{с}}$  – соответственно жесткость инструмента и суппорта;

$\alpha$ ,  $\beta$  – коэффициенты, учитывающие приведение действующей нагрузки соответственно на инструмент и суппорт.

Одним из определяющих факторов колебания в процессе резания упругих перемещений  $\Delta y$ , а следовательно, и образования погрешности размера динамической настройки  $\omega_d \approx \Delta y$ , является изменение силы резания  $\Delta P$ .

Сила резания является функцией входных параметров заготовки, режимов резания и условий обработки  $P = f(C_p, t, HB, v, s, \nu, k \dots)$ . В процессе резания она изменяется в соответствии с колебанием глубины резания  $t$ , твердости обрабатываемого материала  $HB$ , а также при изменениях подачи  $s$ , скорости резания  $\nu$  и условий обработки  $C_p$ .

В соответствии с изложенным для повышения точности обработки путем уменьшения погрешности размера динамической настройки  $\omega_d \Rightarrow \min$  необходимо обеспечить повышение жесткости технологической системы  $j \Rightarrow \max$  и уменьшение колебания силы резания  $\Delta P \Rightarrow \min$ .

Повысить жесткость технологической системы возможно путем выполнения следующих мероприятий:

- 1) уменьшением числа звеньев, а, следовательно, и стыков в системе;
- 2) созданием предварительного натяга в системе для получения определенности базирования деталей станка и приспособления;
- 3) правильной регулировкой клиньев в направляющих станка;
- 4) стабилизацией температуры в производственном помещении;
- 5) повышением собственной жесткости деталей станка и обеспечением их равномерной систематической смазкой;
- 6) применением систем автоматического регулирования жесткости.

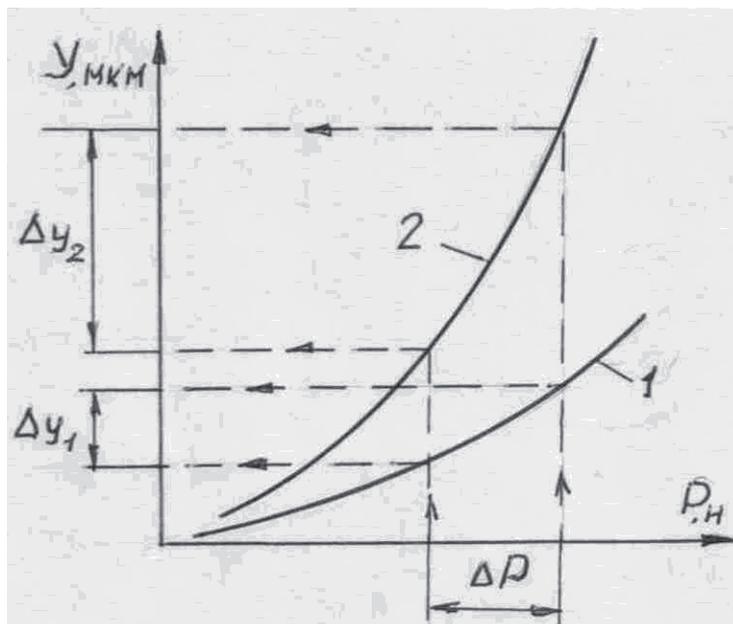


Рис. 5.15. Схема, показывающая влияние жесткости технологической системы на изменения величины упругих перемещений

На рис. 5.15 приведена схема, показывающая влияние различной жесткости технологической системы на изменения величины упругих перемещений. Технологической системе с большей жесткостью соответствует кривая 1, а системе с меньшей жесткостью — кривая 2. Как видно из приведенной схемы, при одинаковом колебании силы резания  $\Delta P$  отклонения упру-

гих перемещений  $\Delta_{y1}$  в системе с большей жесткостью меньше, чем отклонения в другой системе  $\Delta_{y2}$ , жесткость которой ниже ( $\Delta_{y1} < \Delta_{y2}$ ).

Для уменьшения влияния на точность обработки колебания силы резания  $\Delta P$  выполняют сортировку партии заготовок по величине снимаемого припуска  $Z$  или по твердости  $HB$  материала обрабатываемой заготовки. С этой целью измеряют размеры партии заготовок, поступивших на станок, определяют наибольший размер  $A_{нб}$ , которому соответствует наибольший припуск  $Z_{нб}$ , и наименьший размер заготовки  $A_{нм}$ , которому соответствует наименьший припуск  $Z_{нм}$ . Фактический диапазон припуска  $\Delta Z = Z_{нб} - Z_{нм}$  делят на части, например на три, что позволяет уменьшить колебание глубины резания в каждой партии заготовок в три раза:  $\Delta t = \Delta Z / 3$ . Исходную партию заготовок сортируют по размерам на три группы. В первой группе глубина резания равна  $t$ , во второй –  $2t$ , в третьей –  $3t$ . Перед обработкой каждой группы в размер статической настройки вносят коррекцию, все это позволяет уменьшить мгновенное поле рассеяния размеров в партии деталей в 1,5...2 раза.

### **5.6. Вибрации в технологической системе и пути их уменьшения**

Вибрации, возникающие в технологической системе в процессе резания, являются одной из составляющих размера динамической настройки. Они непосредственно сказываются на снижении параметров шероховатости получаемой поверхности и приводят к уменьшению стойкости режущего инструмента, а иногда и к его поломке, в результате чего на станке возникает аварийная ситуация. Появление вибраций вызывает повышенный износ деталей станка, уменьшает точность обработки и обуславливает необходимость ограничения режимов резания, а следовательно, и снижения производительности обработки.

Вибрации – относительно малые перемещения инструмента и детали, возникающие с определенной частотой в процессе обработки, – делятся на два вида: вынужденные колебания системы и автоколебания. Вынужденные колебания возникают под действием периодической возмущающей внешней силы. Причинами вынужденных колебаний являются:

- динамическая неуравновешенность вращающихся деталей системы;
- вибрации, порождаемые дефектами привода станка;
- колебания припуска и твердости обрабатываемой заготовки;
- прерывистость обрабатываемых поверхностей заготовки;
- колебания, передаваемые извне.

Автоколебания – самовозбуждающиеся колебания, которые возникают в процессе обработки при отсутствии периодической внешней силы под действием самой силы резания или при изменении условий обработки. Такие колебания могут возникнуть в момент врезания или выхода инструмента, при возникновении или срыве нароста, изменении жесткости системы по длине обработки, изменении упругих перемещений и пр.

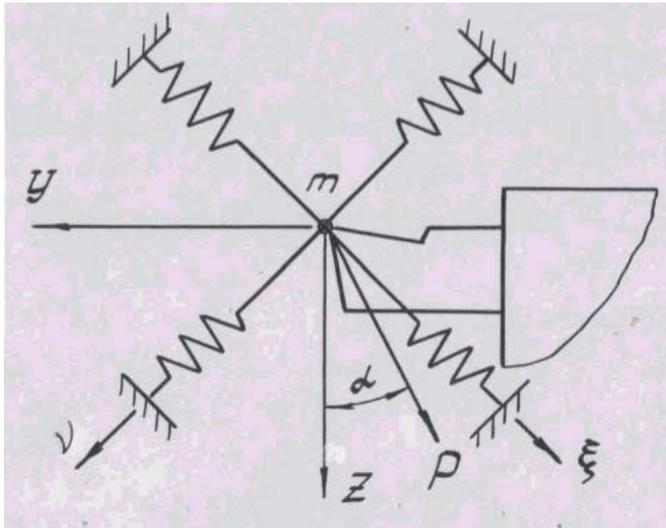


Рис. 5.16. Механическая модель системы токарного станка с упругими связями

Для изучения вибраций создают динамическую модель колеблющейся системы (см. рис. 5.16). При математическом описании процесса всю массу  $m$  колеблющейся системы считают условно сосредоточенной в вершине инструмента. Выявляют направления главных осей жесткости ( $v$  и  $\xi$ ) и путем решения составленных дифференциальных уравнений определяют траекторию перемещения

вершины инструмента при приложении силы резания  $P$  и возникновении вибраций:

$$Y = A_y \cdot \sin(\omega t); Z = A_z \cdot \sin(\omega t - \varphi),$$

где  $A_y$  и  $A_z$  – амплитуды колебательных перемещений вершины резца в направлении координатных осей  $Y$  и  $Z$ ;

$\omega$  – частота колебаний;

$t$  – время;

$\varphi$  – угол сдвига по фазе колебаний.

Приведенные уравнения показывают, что в процессе колебательных перемещений вершина инструмента перемещается в двух направлениях и описывает траекторию в форме эллипса (рис. 5.17, а). При перемещении резца в направлении силы резания от точки 1 к точке 4 глубина резания увеличивается, а следовательно, возрастает и сила резания (рис. 5.17, б). В свою очередь, при обратном перемещении резца от точки 4 к точке 1 глубина резания и сила резания уменьшаются. Таким образом, дополнительное циклическое приращение силы резания приводит к увеличению интенсив-

ности колебаний системы до момента наступления равновесия, при котором возникают равенства получаемой энергии и энергии, затрачиваемой на преодоление сил трения, инерции и веса деталей станка. Показанная на рис. 5.17, б заштрихованная площадь, заключенная между двумя ветвями траектории, представленной в координатах  $P$  и  $\xi$ , определяет работу, выполняемую за один цикл колебательного процесса.

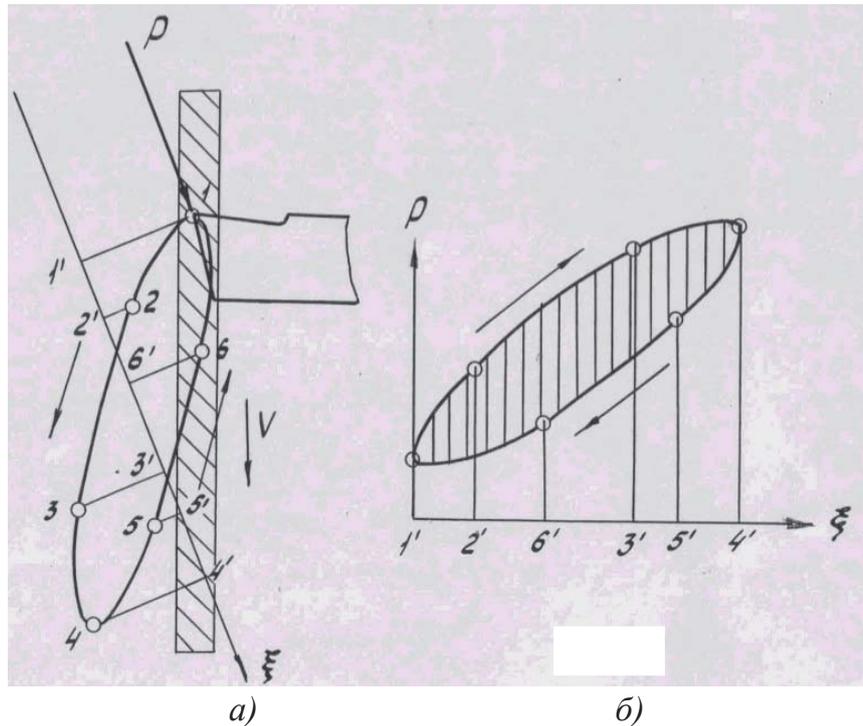


Рис. 5.17. Изменения положения вершины резца и действующей на него нагрузки в процессе колебаний: а – траектория перемещения вершины резца; б – изменение действующей на резец нагрузки

В общем случае причиной, порождающей возникновение вибраций, может быть любой из факторов, способствующих нарушению статического равновесия при резании. К числу таких факторов относятся изменения припуска, твердости материала, изменение жесткости по длине обработки и др.

Для исключения вибраций, которые приводят к резкому ухудшению шероховатости поверхности, снижению параметров точности детали и стойкости режущего инструмента, выполняют следующие конструкторско-технологические решения:

- подбор рациональных режимов обработки, при которых не возникают вибрации;
- снижение дисбаланса вращающихся деталей (динамическая балансировка шпинделей);
- установку станков на специальные виброопоры, исключающие поступление вибрации извне и передачу вибрации со станка на другое оборудование;

- повышение жесткости технологической системы путем регулировки зазора в направляющих, путем создания предварительного натяга и применения дополнительных опор;
- применение специальных демпфирующих устройств и виброгасителей;
- применение систем автоматического регулирования режимов обработки, позволяющих уменьшать вибрации.

Для исключения вибраций при обработке нежестких валов применяют подвижные или неподвижные люнеты. При обработке нежестких корпусных деталей применяют дополнительные регулируемые опоры.

Эффективным средством борьбы с вибрациями является применение различных по конструкции виброгасителей. На рис. 5.18 представлен виброгасящий токарный резец.

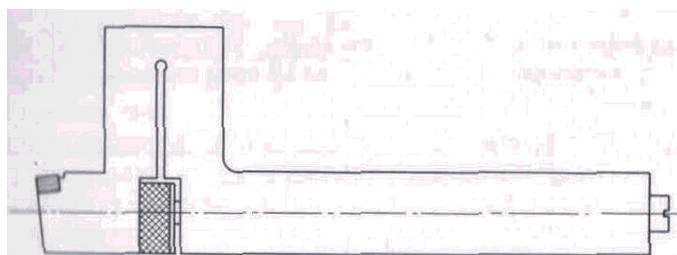


Рис. 5.18. Виброгасящий токарный резец

Изогнутая геометрия корпуса резца позволяет демпфировать колебания силы резания, что способствует снижению уровня вибраций в технологической системе. Виброгасящая расточная оправка ударного действия, приведенная на рис.

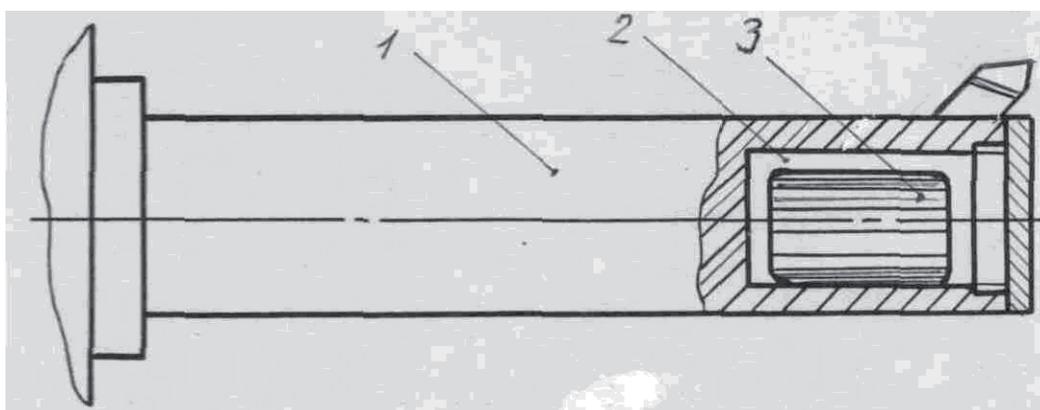


Рис. 5.19. Виброгасящая расточная оправка ударного действия

5.19, предназначена для уменьшения вибраций на расточных станках при обработке отверстий. В корпусе оправки 1 в зоне закрепления резца предусмотрена полость 2, в которую устанавливают груз 3 определенной массы. Массу груза подбирают так, чтобы частота его колебаний была равна частоте колебаний оправки. В этом случае при возникновении вибраций груз начинает колебаться с той

же частотой, что и оправка при угле сдвига по фазе колебаний  $\varphi = 180^\circ$ . В результате происходит динамическое гашение колебаний.

### **5.7. Отклонения, обусловленные тепловыми деформациями в технологической системе и износом режущего инструмента**

Изменения температуры в технологической системе вызывают тепловые деформации обрабатываемой заготовки, деталей и узлов станка, что приводит к формированию дополнительных отклонений размера динамической настройки  $\Delta_d$ , а следовательно, к образованию погрешности обработки. На прецизионных станках влияние отклонений, обусловленных тепловыми деформациями системы, составляют 45...70 % общей погрешности обработки.

Источниками возникновения дополнительного тепла в технологической системе являются: тепло, возникающее при резании металла; работа по преодолению сил трения и деформации в подвижных соединениях и стыках; тепло, возникающее в электро- и гидроприводах, а также тепло, поступающее из окружающей среды. На изменение теплового режима станка оказывают влияние также применение подаваемой смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ) и температура масла, подаваемого в подшипниковые опоры, в гидроцилиндры и другие рабочие органы станка.

Исследования показывают, что при обработке лезвийным инструментом 35 – 70 % тепла, возникающего в зоне резания, уходит в стружку, остальное в деталь и инструмент и далее на другие детали технологической системы. Температура нагрева режущей кромки токарных резцов может достигать  $700 - 1000^\circ$ . Часть тепла излучается и рассеивается в пространстве производственного помещения. Если при токарной обработке в обрабатываемую заготовку уходит 10 – 15 % возникающего в зоне резания тепла, то при сверлении или развертывании отверстий в заготовку уходит 40 – 55 % возникающего тепла. Процентное распределение возникающего при резании тепла по элементам технологической системы зависит от метода и условий обработки, от применяемых режимов резания. С увеличением скорости резания количество тепла, отводимого в заготовку, уменьшается, а в стружку – увеличивается.

Смазочно-охлаждающая жидкость (СОЖ) оказывает благоприятное воздействие на процесс резания. Попадая в зону резания, она отводит тепло от места его образования, охлаждая режущий инструмент

и обработанную поверхность. При этом происходит смазка передней и задней поверхностей инструмента, что способствует уменьшению сил трения при контакте инструмента со стружкой и заготовкой. Все это способствует снижению температуры в зоне резания. Положительное влияние СОЖ позволяет существенно повысить стойкость режущего инструмента, на 8...15 % уменьшить эффективную мощность, потребляемую при резании, и улучшить параметры шероховатости обработанной поверхности.

Для выявления путей снижения тепловых деформаций исследуют температурное поле станка. С этой целью в различных точках станка измеряют отклонения температуры от нормального значения, например  $20^{\circ}$ , и наносят в виде схемы на контур станка, как это показано на рис. 5.20 для круглошлифовального станка.

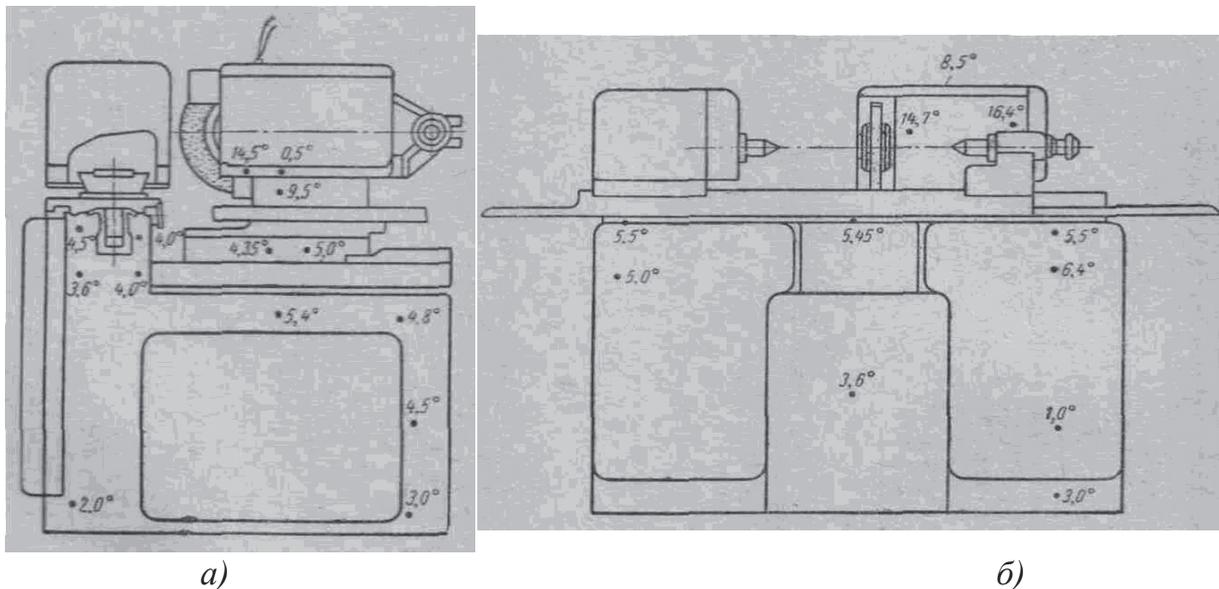


Рис. 5.20. Схема температурного поля круглошлифовального станка

Различное распределение тепла в системе вызывает неравномерный нагрев деталей и узлов станка. Это, в свою очередь, вызывает не только изменение линейных размеров деталей системы, но также и их относительный поворот. Наиболее интенсивный нагрев имеет место в подшипниковых опорах шпинделей и быстроходных валов, где превышение температуры по сравнению с нормальной может достигать  $25 - 40^{\circ}$ .

Влияние тепловых деформаций особенно заметно на финишных операциях, таких как шлифование, тонкая расточка, хонингование, где величина тепловых деформаций соизмерима с допуском на обработку. На этих операциях требуется достижение высокой точности при продолжительных периодах работы энергоемкого оборудования повы-

шенной мощности. Влияние тепловых деформаций возрастает по мере ужесточения допуска на обработку и увеличения режимов резания.

На рис. 5.21 показано влияние температурных деформаций на отклонения линии центров и опорной втулки токарного гидрокопировального станка, определяющих положение заготовки. Эти отклонения приводят к изменению положения координатной системы  $XOY$  баз станка (рис. 5.21, *a*) за время его работы  $\tau$  (ч), что показывают функции:

$v_{CT} = \mu(\tau)$  – смещения линии центров в радиальном направлении ( $OY$ );

$\gamma_{CT} = \psi(\tau)$  – поворот линии центров;

$a_{CT} = f(\tau)$  – смещения опорной втулки в осевом направлении ( $OX$ ).

Как видно из графиков, тепловые деформации на замыкающем звене в начальный период работы станков растут, а затем достигают определенного уровня, при котором происходит их стабилизация, что означает наступление теплового равновесия. В процессе теплового равновесия имеет место приблизительное равенство подводимого и отводимого в систему теп-

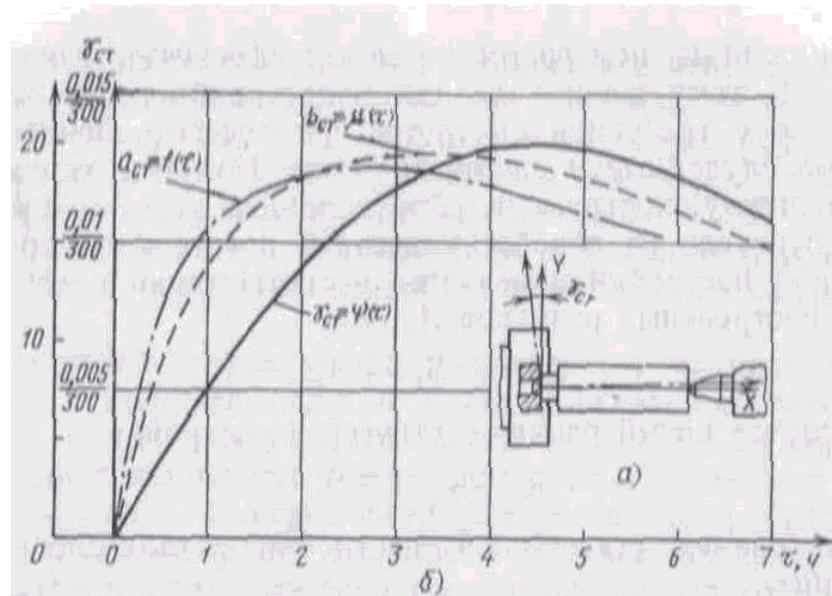


Рис. 5.21. Влияние температурных деформаций на отклонения базовых поверхностей токарного гидрокопировального станка: *a* – отклонения координатной системы баз станка; *б* – изменения во времени параметров смещения и поворота базовых поверхностей токарного станка

ла. При прекращении работы происходит охлаждение деталей и узлов технологической системы и уменьшение температурных деформаций.

Исследования показывают, что изменения температуры на различных участках деталей и узлов системы происходят по экспоненциальной линии. В соответствии с этим изменения во времени линейных и угловых отклонений исполнительных поверхностей на замыкающем звене технологической системы  $\Delta L$  можно представить зависимостью

$$\Delta L = \Delta L_0 \cdot (1 - e^{-\beta\tau}),$$

где  $\Delta L_0$  – отклонения в начальный момент времени;

$\tau$  – время работы в минутах;

$\beta$  – коэффициент, определяющий характер экспоненциальной зависимости;

$e$  – основание натуральных логарифмов.

Параметр  $\beta$  зависит от теплоотдачи и теплоемкости конструкции, от ее размеров и массы. Он может иметь различные значения для каждого из координатных направлений и определяется путем соответствующей математической обработки полученных экспериментальных данных.

Так как продолжительность непрерывной работы станка определяется циклическостью обработки заготовок, то соответственно этому имеет место циклический характер изменения температурных деформаций элементов системы. Это наглядно видно на приведенном графике (рис. 5.22) изменений вылета резца токарного полуавтомата  $\Delta v$ , которые обусловлены температурными деформациями системы. Согласно проведенным исследованиям [1] изменения вылета проходного резца вследствие температурных деформаций могут составлять до  $\Delta v = 7$  мкм.

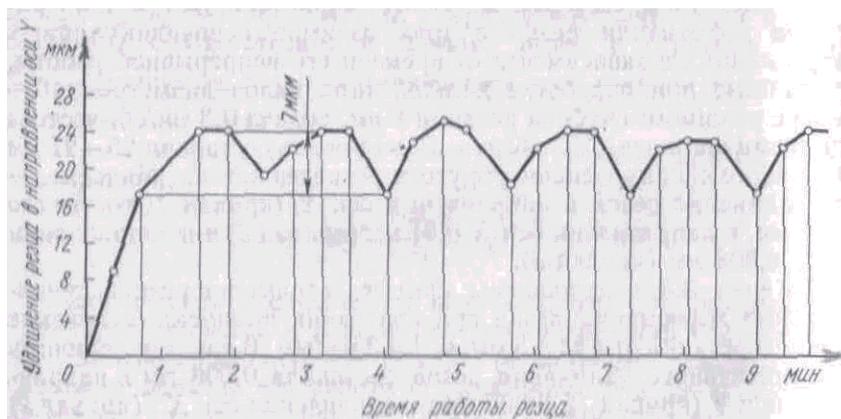


Рис. 5.22. Влияние температурных деформаций  $\Delta v$  на изменения вылета резца  $\Delta v$  токарного полуавтомата

мероприятиям следует отнести:

- удаление электродвигателей, гидростанции и других узлов, представляющих источники тепла, как можно дальше от рабочей зоны, исполнительных поверхностей станка, это особенно важно для прецизионных станков;
- создание условий для обеспечения более интенсивной естественной вентиляции в местах повышенного нагрева;
- встраивание в механизмы дополнительных вентиляторов;
- создание в гидробаках станков и в емкостях для СОЖ систем при-

Уменьшения влияния температурных деформаций на точность обработки достигают путем выполнения ряда конструкторских и технологических мероприятий. К основным конструкторским

нудительного охлаждения с использованием змеевиков, через которые пропускается охлаждающая жидкость;

- создание специальных термоконстантных производственных помещений (цехов или участков), где поддерживается постоянная температура 20 °С с точностью  $\pm 0,5$  °С;
- применение на станках специальных систем, обеспечивающих автоматическую компенсацию на замыкающем звене отклонений, порождаемых температурными деформациями.

Повышения интенсивности естественной вентиляции в местах повышенного нагрева достигают путем создания дополнительных вентиляционных окон, увеличения площади поверхности повышенного нагрева, для чего на поверхности создают ребрение специальной геометрии. На отдельных прецизионных станках, и в частности на резьбошлифовальных, осуществляют охлаждение шпинделя и кареток путем пропускания через специально создаваемые каналы охлаждающей жидкости. Аналогичные каналы для пропускания охлаждающей жидкости предусматривают и в резцах тяжелых токарных станков.

К основным технологическим мероприятиям, обеспечивающим уменьшение влияния тепловых деформаций на точность обработки, следует отнести:

- выполнение обработки с применением смазочно-охлаждающей жидкости ;
- выполнение обработки на более высоких скоростях резания, что позволяет уводить большую часть тепла в стружку;
- выполнение точной обработки на разогретом станке, когда достигается тепловое равновесие и тепловые деформации стабилизируются;
- применение одностороннего жесткого закрепления для длинных заготовок, что позволяет свободно деформироваться их незакрепленной части;
- шлифование валов с применением кругов большего диаметра;
- закрепление длинных валов при шлифовании и точении с использованием подпружиненного заднего центра для компенсации деформаций в осевом направлении (рис. 5.23);
- выполнение правильной статической настройки станка, при которой учитываются отклонения, порождаемые тепловыми деформациями в технологической системе;
- исключение длительных перерывов в работе оборудования.

В условиях крупносерийного и массового производств существенное влияние на точность обработки партии деталей оказывает разброс температуры заготовок, поступающих на обработку с предыдущей операции. Для устранения этого необходимо осуществлять выравнивание температуры заготовок и организационными мероприятиями добиваться ритмичности производства.

Пример применения на координатно-расточном станке специального устрой-

ства, обеспечивающего автоматическую компенсацию отклонений, порожденных тепловыми деформациями, представлен на рис. 5.23. При обработке деталей на прецизионных координатно-расточных и на координатных планетарно-шлифовальных станках в результате тепловых деформаций происходит смещение координатной системы  $X_{и} Y_{и} Z_{и}$ , связанной со шпинделем станка, относительно координатной системы  $X_c Y_c Z_c$  рабочего стола. Для компенсации возникающих на замыкающем звене отклонений применяется устройство, принцип действия которого основан на использовании встраиваемого в станок стержня, длина которого изменяется по определенному закону под действием колебания температуры окружающей среды [1]. В результате проведения предварительных исследований было установлено, что наибольшие относительные отклонения шпинделя, обусловленные тепловыми деформациями, имеют место в направлении оси  $Y$ . Это и определило место встройки корректирующего устройства. Удлинительный стержень 3 встраивают в верхней части станины станка таким образом, что его линейный размер  $B_3$  непосредственно входит как составляющее звено в технологическую размерную цепь  $B_{\Delta}$ , расположенную в координатной плоскости  $YOZ$ :

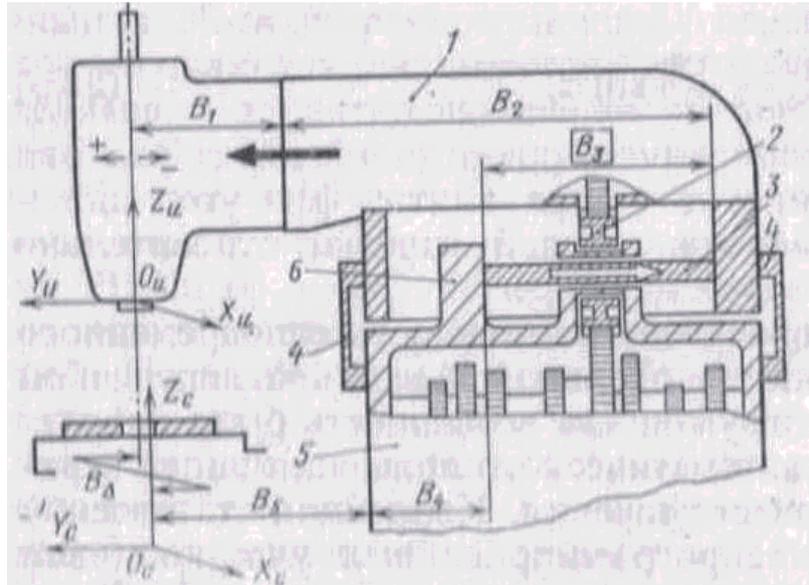


Рис. 5.23. Устройство автоматической компенсации отклонений оси шпинделя координатно-расточного станка, порожденных тепловыми деформациями

$$B_{\Delta} = B_1 + B_2 - B_3 - B_4 - B_5,$$

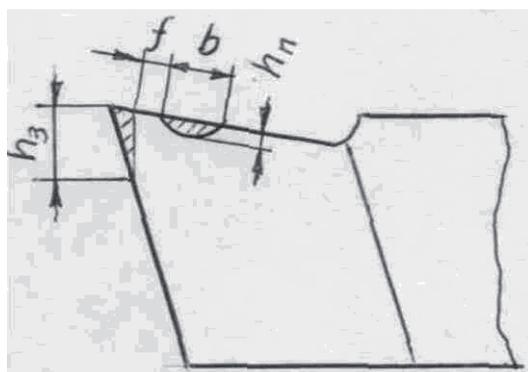
где  $B_{\Delta}$  – размер, определяющий совпадения оси вращения шпинделя с требуемыми положениями оси отверстия в обрабатываемой детали.

С одной стороны удлинительный стержень упирается в опорный кронштейн 6, расположенный на станине станка 5, а с противоположной стороны – в заднюю стенку корпуса шпиндельной головки 1. Шпиндельная головка соединена со станиной станка расположенными с двух сторон плоскими упругими элементами 4, дополнительно усиливающими жесткость соединения в плоскости  $YOX$ . Таким образом, все нагрузки, действующие на шпиндельную головку в направлении оси  $Y$ , передаются непосредственно на станину через удлинительный стержень. Передача крутящего момента с коробки скоростей на шпиндель станка происходит через промежуточную шестерню 2. Причем удлинительный стержень проходит по внутреннему отверстию опоры промежуточной шестерни. При изменении температуры под действием тепла, поступающего с зоны резания и привода станка, происходит тепловое удлинение стержня. В результате этого шпиндельная головка перемещается относительно станины станка в сторону, противоположную направлению тепловых деформаций шпинделя. Размеры удлинительного стержня подбирают с учетом коэффициента линейного расширения его материала таким образом, чтобы удлинение стержня соответствовало тепловым деформациям на замыкающем звене. В результате отклонения оси шпинделя, порождаемые тепловыми деформациями станка, компенсируются изменением размера статической настройки путем автоматического смещения шпиндельной головки относительно станины. В свою очередь, симметричная конструкция рассматриваемого координатно-расточного станка позволяет минимизировать тепловые отклонения оси шпинделя в плоскости  $X_{и} O_{и} Z_{и}$ .

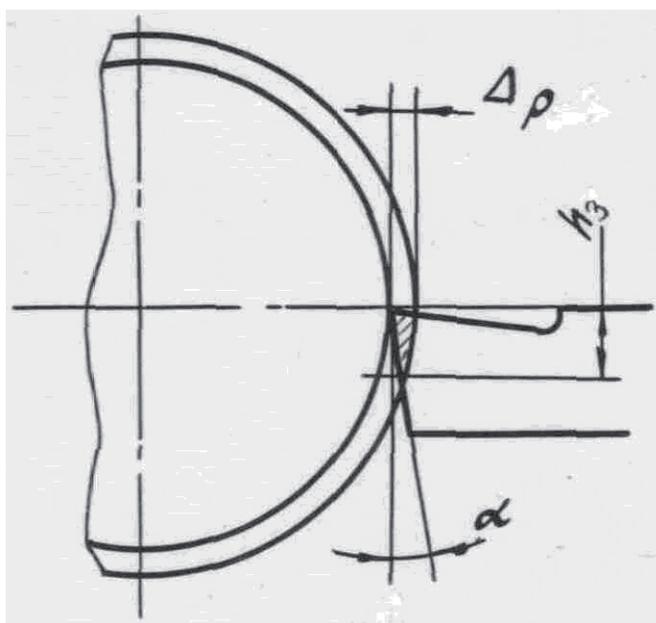
#### ***Уменьшение влияния износа режущего инструмента на точность***

В процессе эксплуатации режущего инструмента, например резца, при резании металла происходит трение стружки о переднюю поверхность инструмента и трение задних поверхностей инструмента по поверхности заготовки. В результате истирания рабочих поверхностей инструмента, удаления с них микрочастиц и образования на них микросколов происходит износ режущего инструмента и, как следствие, изменение его размеров и геометрии. Износ инструмента на его передней и задней поверхностях проявляется в виде площадок износа (рис.

5.24, а) . При этом износ по задней грани характеризует высота  $h_3$  площадки износа, а износ по передней грани характеризует глубина лунки  $h_n$ , имеющей ширину  $b$ . В процессе износа резца одновременного по передней и задней поверхностям образуется перемычка шириной  $f$ , которая по мере износа уменьшается, и при достижении нулевого значения  $f \Rightarrow 0$  возникает катастрофический износ, приводящий к поломке режущего инструмента [3].



а)



б)

Рис. 5.24. Износ резца: а – по передней и задней поверхностям; б – размерный износ резца

За критерий износа в большинстве случаев принимают износ по главной задней поверхности  $h_3$ , который для токарных резцов из быстрорежущей стали допускается в пределах  $h_3 = 1,5 \dots 2$  мм, а для резцов с пластинами из твердого сплава –  $h_3 = 0,8 \dots 1,2$  мм.

Изменение линейного размера режущего инструмента в направлении получаемого размера детали  $\Delta_p$  называют *размерным износом*. Этот износ формируется в процессе эксплуатации инструмента, в результате обработки группы заготовок. Его величина непосредственно зависит от износа инструмента по задней грани  $h_3$  (см. рис. 5.24, б) и определяется по формуле

$$\Delta_p = h_3 \cdot \operatorname{tg} \alpha,$$

где  $\alpha$  – главный задний угол.

Размерный износ проявляется как постоянный систематически действующий фактор, влияние которого на точность обычно происходит в

совокупности с температурными деформациями. Он непосредственно вызывает отклонения размера статической настройки, а, следовательно, и отклонения получаемых размеров детали.

В свою очередь, износ рабочих поверхностей инструмента и изменение их геометрии приводит к затуплению режущего инструмента и потере им режущих свойств. В результате этого происходит дополнительное увеличение силы резания  $\Delta P$ , а следовательно, и увеличение погрешности  $\Delta_d$  размера динамической настройки. Интенсивность износа инструмента зависит от многих факторов – от режимов обработки, свойств материала режущей части инструмента и обрабатываемой заготовки, геометрии инструмента и свойств применяемой смазочно-охлаждающей жидкости и др.

Зависимость износа инструмента  $h_3$  от продолжительности его работы в общем случае определяет кривая, представленная на рис. 5.25. Кривая износа инструмента имеет три характерных участка, каждый из которых соответствует определенному периоду эксплуатации режущего инструмента. Первый период I, который начинается с момента начала эксплуатации нового инструмента до момента  $\tau_1$ , называется пе-

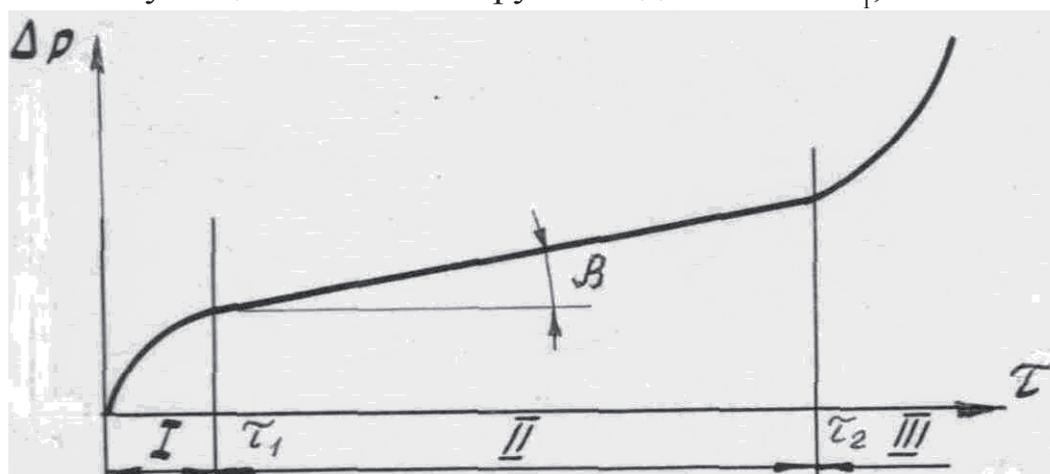


Рис. 5.25. Зависимость размерного износа реза от продолжительности его работы

риодом приработки. Это период начального износа рабочей части инструмента, для которого характерна высокая интенсивность износа, получаемая в результате истирания выступающих участков на передней и задней гранях инструмента.

Второй период II в интервале времени от  $\tau_1$  до  $\tau_2$  называется периодом нормального износа, для которого характерна наименьшая интенсивность износа рабочих поверхностей инструмента, которая характеризуется зависимостью

$$tg\beta = (h_{32} - h_{31}) / (\tau_2 - \tau_1),$$

где  $h_{31}$  и  $h_{32}$  – значения износа соответственно на конец первого и второго периодов его эксплуатации (мм);

$\tau_1$  и  $\tau_2$  – время окончания первого и второго периодов эксплуатации инструмента (мин).

Так как размерный износ инструмента напрямую зависит от износа инструмента по задней грани  $\Delta_{p1} \equiv h_{31}$ ,  $\Delta_{p2} \equiv h_{32}$ , то с учетом  $\tau_1 = (\tau_2 - \tau_1)$  получим следующее выражение, определяющее интенсивность размерного износа инструмента:

$$tg\beta = (\Delta_{p2} - \Delta_{p1}) / \tau_1,$$

где  $\tau_1$  – продолжительность периода нормального износа инструмента.

Третий период, начинающийся с момента  $\tau_2$ , называется периодом катастрофического износа. В этот период имеет место наибольшая интенсивность износа режущего инструмента и в любой момент времени существует вероятность внезапной поломки инструмента. Для исключения вероятности поломки и появления аварийной ситуации инструмент следует принудительно менять по окончании периода нормального износа, при достижении момента  $\tau_2$ .

Для уменьшения периода приработки инструмента необходимо выполнять тщательную доводку его режущих кромок, что позволяет повысить точность геометрической формы режущей части инструмента. Опытные рабочие для выполнения ответственных переходов, где требуется достижение повышенной точности, применяют подготовленный инструмент, который прошел период приработки при изготовлении менее ответственных деталей.

Под стойкостью режущего инструмента  $T$  понимают продолжительность его работы (в минутах) между двумя переточками на определенных режимах. Наибольшее влияние на стойкость оказывает скорость резания  $v$ , и при определенных условиях обработки между ними имеет место зависимость

$$v_1 \cdot T_1^m = v_2 \cdot T_2^m = \dots = v_n \cdot T_n^m = \text{const},$$

согласно которой  $v = \frac{C_v}{T^m}$ , где  $C_v$  – коэффициент, учитывающий свойства обрабатываемого материала и условия обработки,  $m$  – показатель относительной стойкости, который для резцов из быстрорежущей стали составляет  $m = 0,12 \dots 0,15$ , а для твердосплавных –  $m = 0,2 \dots 0,25$ .

Применяемый режущий инструмент в целом имеет значительный разброс по стойкости. Его расчетная стойкость может в 2 – 3 раза отли-

чаться от фактической стойкости. Это, в первую очередь, зависит от качества его изготовления. Поэтому для исключения случайной поломки инструмента и возникновения брака необходимо постоянно следить за техническим состоянием инструмента и оценивать его режущую способность. С этой целью на практике используют три критерия:

1) *временной критерий*, согласно которому инструмент требует замены, когда продолжительность его эксплуатации достигает расчетного периода стойкости, полученного по формулам теории резания;

2) *технологический критерий*, в соответствии с которым инструмент требует замены, когда хотя бы один из параметров точности изготавливаемой детали выходит за пределы поля допуска, а размерная поднастройка инструмента не представляется возможной;

3) *силовой критерий*, согласно которому инструмент требует замены, когда в процессе его эксплуатации сила резания достигает допускаемого предельного значения, при котором возможна поломка инструмента.

Основными путями уменьшения влияния размерного износа инструмента на точность механической обработки являются:

- повышение качества и обеспечение стабильности параметров изготавливаемого режущего инструмента;
- повышение качества доводки режущей части инструмента для уменьшения продолжительности периода его приработки;
- правильная статическая настройка станка;
- уменьшение колебаний и стабилизация силы резания;
- выбор рациональных режимов обработки, обеспечивающих достижение требуемых параметров точности детали при требуемой производительности;
- уменьшение вибраций в технологической системе;
- применение смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ);
- своевременная компенсация размерного износа;
- своевременная замена режущего инструмента для выполнения его переточки.

При работе на универсальных станках и на станках полуавтоматах контроль за состоянием инструмента и его своевременную замену выполняет рабочий. В условиях автоматизированного производства при использовании станков, автоматов и многоцелевых станков, работающих продолжительное время в автоматическом режиме без участия че-

ловека, функции контроля за состоянием инструмента выполняют автоматические системы. Такие системы оценивают состояние режущего инструмента комплексно, одновременно по двум или трем рассмотренным выше критериям и в соответствующий момент времени выдают команду на замену инструмента. Неообходимость комплексной оценки состояния инструмента объясняется тем, что ни один из трех критериев не позволяет однозначно предсказать изменение его состояния в процессе резания, которое зависит от совокупности случайных и систематических факторов, определяющих входные параметры заготовки, качество изготовления инструмента и условия обработки.

### **5.8. Уменьшение влияния перераспределения остаточных напряжений на точность обработки**

Внутренние остаточные напряжения в заготовках и деталях возникают при выполнении технологических процессов под воздействием внешних и внутренних сил, при приложении и снятии различных нагрузок. Причинами их возникновения являются неоднородности линейных и объемных изменений, возникающие в смежных макро-, микро- и ультрамикроскопических объемах металла. Технологи-машиностроителей в первую очередь интересуют напряжения, которые возникают в результате объемных изменений вследствие неравномерного нагрева или охлаждения, а также фазовые и структурные превращения металла, происходящие при пластической деформации, наклепе и других причинах [9].

Формирование различных по величине остаточных напряжений происходит при выполнении таких технологических процессов, как литье, обработка давлением, сварка, механическая обработка резанием, термообработка и др. В соответствии с этим различают остаточные напряжения литейные, ковочные, термические, сварочные, напряжения, возникающие при механической обработке, нанесении покрытий и др.

Остаточные напряжения, возникающие при выполнении заготовительных операций, при удалении припуска на операциях механообработки или при термическом воздействии, вызывают нарушения равновесия, которые приводят к тому, что деталь начинает деформироваться до тех пор, пока перераспределение (релаксация) напряжений не приведет к новому равновесному состоянию. Деформации и коробления поверхностей деталей, возникающие под действием остаточных напря-

жений, приводят к отклонениям (потере) достигнутой геометрической точности деталей. Эти отклонения в большинстве случаев появляются позднее, после сборки, при эксплуатации машины, в результате чего качественные показатели машины значительно снижаются. Потеря геометрической точности деталей при работе их в машинах крайне нежелательна, а для деталей точных станков, приборов и ряда других изделий повышенной точности она вообще недопустима.

Для устранения негативных явлений, вызываемых перераспределением в заготовках и деталях остаточных напряжений, в технологических процессах предусматривают операции естественного или искусственного старения. Под старением понимается изменение свойств материала, протекающее во времени без заметного изменения его микроструктуры. Целью операций старения является устранение остаточных напряжений и достижение равновесного состояния в материале детали, что позволяет исключить в дальнейшем деформацию и коробление детали, обеспечив сохранение ее геометрической точности. При этом для выведения получаемых отклонений вслед за операцией старения в технологическом процессе предусматривают необходимую чистовую или отделочную операцию. Для высокоточных деталей, например зубчатых колес 6...5-й степеней точности, операция искусственного старения с последующей отделкой обрабатываемых поверхностей, в данном случае боковых поверхностей зубьев, может выполняться неоднократно.

В заготовках отливках, поковках, штамповках остаточные напряжения обычно возникают в местах сопряжения различных по размерам геометрических форм. В отливках остаточные напряжения возникают по причине сопротивления материала формы и стержней протеканию процесса свободной усадки металла, а также в результате неравномерного охлаждения различных по толщине частей отливки. Поэтому в местах резкого перехода от широких стенок заготовки к тонким внутренним напряжения достигают особенно больших значений. Примерами таких деталей являются станины станков, рамы, различные корпусные детали, кронштейны и др.

Для снижения в отливках остаточных напряжений необходима тщательная конструктивная проработка геометрических форм заготовок и деталей с целью исключения значительной разностенности, острых углов и резких переходов от скоплений металла к тонким стенкам, которые отвечают требованиям равномерного остывания и затвердевания металла.

Устранения в заготовках остаточных напряжений достигают путем естественного или искусственного старения. При естественном старении заготовки помещают под навес для вылеживания их на улице при естественных колебаниях температуры окружающей среды. При этом в заготовках происходит постепенное перераспределение, выравнивание внутренних напряжений. Этот процесс вначале протекает интенсивно, а затем замедленно. Продолжительность вылеживания различных по массе и геометрии заготовок составляет от одного до нескольких месяцев, а для заготовок точных деталей, например для станин прецизионных станков, продолжительность естественного старения составляет более года.

Для ускорения процесса снятия остаточных напряжений и сокращения цикла производства применяют искусственное старение – термическую обработку, позволяющую снять остаточные напряжения и улучшить механические и другие свойства материала. Термическая обработка – совокупность технологических операций, связанных с нагревом, выдержкой и охлаждением заготовки. Основными видами такой термической обработки является отжиг, нормализация, отпуск. Заготовки черных металлов мелких и средних размеров помещают в печь и подвергают отжигу, режим которого устанавливают в соответствии с химическим составом материала заготовки и требованием получения его структуры и необходимых свойств.

Для снятия остаточных напряжений, получаемых на предшествующих заготовительных операциях, а также на операциях механообработки и сварки, выполняют низкий или неполный отжиг, при котором температура составляет 200...700 °С. В большинстве случаев эта температура соответствует температуре начала рекристаллизации и составляет 550...680 °С, а при неполном отжиге она на 30...50 °С выше температуры начала рекристаллизации. В свою очередь, согласно А.А. Бочвар, температура рекристаллизации для черных металлов равна  $T_p = (0,5...0,6) T$ , где  $T$  – температура плавления материала. Время выдержки заготовок при этой температуре составляет от одного до нескольких часов, после чего выполняют медленное охлаждение заготовок вместе с печью. Так, например, режим искусственного старения отливок для корпусов из серого чугуна предусматривает медленный нагрев заготовок в течение 3...4 ч до температуры 500...650 °С, выдерживание при такой температуре 4...6 ч, а затем медленное охлаждение вместе с пе-

чью до 200 °С в течение 20...24 ч с последующим охлаждением на воздухе.

Скорость охлаждения стальных заготовок устанавливают с учетом степени легированности стали. Для заготовок из углеродистых сталей скорость охлаждения устанавливают 100...200 °С/ч, а для заготовок из легированных сталей – 20...70 °С/ч.

В тех случаях, когда помимо снятия остаточных напряжений требуется обеспечить измельчение микроструктуры материала и повышение уровня его механических свойств, применяют другие виды термической обработки – полный отжиг, нормализацию, закалку и отпуск. Для этих операций применяют другие режимы нагрева и более высокие скорости охлаждения заготовок [9, 15].

Для снятия в заготовках остаточных напряжений применяют также механические способы старения. К ним относятся обработка на дробеструйных аппаратах, голтовка во вращающихся барабанах вместе с другими деталями или небольшими кусками чугуна, а также вибростарение с использованием высокочастотных колебаний и вибраторов.

Мелкие заготовки помещают во вращающийся барабан, где в результате хаотических ударов в заготовках происходит перераспределение и выравнивание внутренних напряжений. На крупные заготовки станин и корпусных деталей устанавливают специальные вибраторы, с помощью которых создают продольные и поперечные колебания определенной амплитуды и частоты, способствующие выравниванию внутренних напряжений. Так, например, для станин при использовании вибраторов с плавным регулированием частоты колебаний в диапазоне 10...150 Гц продолжительность процесса вибростарения составляет 30...45 мин, в результате чего достигают уменьшения остаточных напряжений на 50 %.

После черновой обработки, когда с заготовки снимается основной припуск, также происходит нарушение баланса внутренних напряжений, которое вызывает деформации и коробление заготовки. Для выравнивания возникающих внутренних напряжений заготовку после обдирки также подвергают естественному или искусственному старению, что особенно важно для ответственных деталей. При этом заготовку необходимо обязательно освободить от сил закрепления, что позволит ей свободно деформироваться в процессе перераспределения остаточных напряжений. В противном случае при последующей чи-

стовой обработке заготовка будет обработана в деформированном состоянии, а затем после снятия закрепления неизбежно произойдет ее деформация, что приведет к потере геометрической точности детали. Это обстоятельство объясняет необходимость разделения в технологическом процессе черновых и чистовых операций.

Таким образом, для получения деталей высокой точности операция искусственного старения на различных этапах технологического процесса может выполняться неоднократно. При этом непосредственно за старением предусматривают отделочную операцию, на которой устраняют геометрические отклонения, полученные в результате деформаций.

В заготовках, полученных давлением путем свободнойковки, штамповки, или в заготовках прокатанного производства в результате неравномерного деформирования и остывания различных элементов, например полок, стенок, ребер и др., также возникают остаточные напряжения, которые порождают возникновение деформаций деталей, изготовленных из этих заготовок. Для снятия остаточных напряжений в стальных заготовках, полученных давлением, также применяют искусственное старение – термическую обработку, при которой заготовки, помещенные в печь, нагревают до температур фазовых превращений (возможно ниже или выше), выдерживают при заданной температуре, а затем охлаждают с определенной скоростью. При изготовлении закаленных точных зубчатых колес, для которых в большинстве случаев применяют заготовки, полученные давлением, выполнение на различных этапах технологического процесса термических операций, таких как отжиг, нормализация, закалка, отпуск и др., позволит сократить остаточные напряжения и изменить структуру зерна, обеспечив улучшение обрабатываемости материала и получение нужных физико-механических свойств зубчатого венца и базовых поверхностей.

Остаточные напряжения в заготовках таких деталей, как гладкие и ступенчатые валы, ходовые винты планки, пластинки и др., возникают также при холодной правке (рихтовке), которую применяют для устранения искривления осей заготовок и готовых деталей. Выправленные заготовки с оставшимися внутренними напряжениями поступают на механическую обработку. После снятия поверхностных слоев происходят дальнейшие перераспределения остаточных напряжений и полученные детали вновь деформируются. При этом деформации могут продолжаться неопределенно долго, сказываясь в виде потери точ-

ности детали при ее работе в машине. Поэтому при изготовлении таких деталей, как прецизионные ходовые винты, холодная правка в процессе их изготовления категорически запрещается, необходимая точность в таких случаях достигается за счет перецентровки заготовки и снятия больших припусков.

Снятие поверхностного слоя металла с одной стороны заготовки обычно приводит к перераспределению остаточных напряжений и деформациям детали. Например, фрезерование шпоночного паза в длинном валике, изготовленном из холоднотянутого прутка, приводит к искривлению его оси.

Сварочные напряжения возникают в результате неравномерного нагрева и остывания металла в процессе сварки. При перемещении источника тепла вдоль шва металл в зоне наплавки интенсивно нагревается. Смежные участки металла, обладая более низкой температурой, препятствуют расширению нагретого металла и создают в нем напряжения сжатия. При остывании в наплавленном слое возникают остаточные напряжения растяжения, так как окружающий металл тормозит уменьшение его объема. Величина остаточных напряжений может достигать предела текучести металла. Эти напряжения приводят к деформациям и короблению сварных соединений, величина которых нередко превосходит допуск на размеры изделия. Уменьшению или снятию сварочных напряжений способствуют:

- конструирование сварных соединений со швами, симметричными относительно геометрической оси соединяемой детали;
- обеспечение правильной последовательности наложения сварных швов и выбор необходимой интенсивности сварочных режимов;
- применение последующей термической правки деталей путем местных нагревов или наложения специальных «фальшивых» швов;
- мероприятия искусственного старения, применяемые для снятия остаточных напряжений в отливках.

Остаточные напряжения в поверхностных слоях металла возникают также в результате выполнения таких операций, как поверхностно-пластическое деформирование (ППД), холодное накатывание зубчатых колес или шлицев на валах, при волочении, развальцовке, при калибровке отверстий с помощью прошивок, шариков, а также при упрочнении поверхностей путем механического наклепа или воздействия магнитным полем. Для исключения брака остаточные напряжения при вы-

полнении этих операций не должны превышать допустимые предельные значения. Так, например, увеличение остаточных напряжений при упрочнении поверхностей направляющих станин и кареток наклепом с использованием шариковых сепараторов может вызывать перенаклеп, и, как следствие, отслоение поверхностного слоя направляющих.

В процессе резания получаемый на детали поверхностный слой испытывает воздействие силы резания и сильного кратковременного температурного поля. В результате в металле перед режущей кромкой инструмента, перемещаемой в направлении подачи, формируется ограниченная зона сложного упруго-напряженного состояния, которая затем переходит в пластическую деформацию. Вследствие этого на поверхностном слое обработанной поверхности возникают остаточные напряжения, которые в зависимости от метода, условий и режима обработки могут быть сжимающими  $+\sigma$  или растягивающими  $-\sigma$ . Сжимающие напряжения повышают предел выносливости материала, а растягивающие приводят к его уменьшению. Механические свойства поверхностного слоя существенно отличаются от свойств остальной массы материала детали. Пластическое деформирование поверхностного слоя приводит к его упрочнению, называемому наклепом, которое распространяется на глубину  $h_n$ . Степень наклепа поверхностного слоя  $\delta H$  определяется выражением

$$\delta H = (H_{\text{обр}} / H_{\text{исх}}) 100 \%,$$

где  $H_{\text{исх}}$  и  $H_{\text{обр}}$  – соответственно твердость материала в сердцевине заготовки и твердость на обработанной поверхности.

Глубина наклепа зависит от физико-механических свойств обрабатываемого материала и режимов обработки и может составлять от сотых долей мм при чистовой обработке, до нескольких мм при грубой черновой обработке. При этом пластичные металлы в процессе обработки получают значительно большее упрочнение, чем твердые и хрупкие.

Согласно исследованиям Э.В. Рыжова, А.Г. Сусллова [26] параметры наклепа составляют:

- для точения  $\delta H = 120 \dots 150 \%$  ;  $h_n = 30 \dots 50$  мкм;
- для торцевого фрезерования  $\delta H = 140 \dots 160 \%$  ;  $h_n = 40 \dots 100$  мкм;
- для плоского шлифования  $\delta H = 150 \%$  ;  $h_n = 16 \dots 35$  мкм.

Упрочнение поверхности и создание в поверхностном слое сжимающих напряжений можно использовать как положительное явление для повышения поверхностной твердости деталей. Например, создание

сжимающих напряжений на рабочих поверхностях ряда деталей, таких как станины и столы с направляющими, пиноли, гидроцилиндры, толкатели, клапана, способствует повышению их износостойкости и усталостной прочности.

Однако наряду с этим упрочненный поверхностный слой на поверхностях заготовок и деталях может оказывать также и негативное воздействие. Остаточные напряжения в упрочненном поверхностном слое детали со временем могут вызвать деформации и, как следствие, отклонения ее геометрической точности. А упрочнения на поверхностях заготовки, полученные при черновой обработке, оказывают отрицательное влияние на процесс резания при выполнении чистовых операций – протягивания, развертывания, тонкой расточки. Необходимость снятия упрочненного поверхностного слоя требует увеличения припуска и обуславливает быстрый износ режущего инструмента при одновременном ухудшении шероховатости поверхности.

На формирование остаточных напряжений при фрезеровании существенное влияние оказывает затупление фрезы, поэтому износ зубьев фрезы по задней поверхности не должен превышать 0,4 мм. При шлифовании остаточные напряжения во многом зависят от величины снимаемого припуска, значение которого не рекомендуется назначать более 0,3 мм. Остаточные напряжения в поверхностном слое детали снижаются с уменьшением твердости шлифовального круга и его зернистости, а также с уменьшением скорости шлифования и величины поперечной подачи на проход. При этом необходимо своевременно выполнять правку шлифовального круга для поддержания его режущей способности и применять СОЖ с хорошими охлаждающими свойствами.

Изучение характера распределения остаточных напряжений, а также их качественных и количественных характеристик позволяет правильно построить технологический процесс изготовления детали, обеспечив получение требуемых качественных показателей в соответствии с ее служебным назначением.

К числу основных конструкторско-технологических мероприятий, способствующих уменьшению влияния остаточных напряжений на точность изготавливаемой детали, следует отнести:

- разработку геометрических форм заготовок отливок, поковок и сварных деталей, отвечающих требованиям равномерного остывания и затвердевания металла;

- правильное выполнение технологий получения отливок, поковок и заготовок сварных деталей;
- введение в технологический процесс операций искусственного и естественного старения;
- выделение черновой и чистовой обработок в отдельные операции с перезакреплением заготовок при их выполнении;
- правильное распределение припуска на обработку с учетом остаточных напряжений в заготовках и формируемых при обработке.

Таким образом, задача технолога заключается в разработке такого технологического процесса, который позволяет получить деталь с минимальными остаточными напряжениями, не оказывающими влияния на потерю ее точности в процессе эксплуатации. При этом деформации и коробления, возникающие под действием остаточных напряжений на различных этапах технологического процесса, должны быть удалены на операциях отделочной обработки.

### **Вопросы для самопроверки**

1. Что следует понимать под коэффициентом уточнения и передаточным отношением технологической системы?
2. Как рассчитать требуемое уточнение  $\varepsilon_r$ , которое необходимо обеспечить при изготовлении детали из выбранной заготовки?
3. Какие три этапа необходимо выполнить для настройки технологической системы на точность?
4. Что следует понимать под погрешностью установки заготовки?
5. Назовите основные пути сокращения погрешности установки.
6. Что такое статическая настройка технологической системы?
7. Что следует понимать под размером статической настройки?
8. Назовите основные пути повышения точности размера статической настройки.
9. Что такое динамическая настройка технологической системы?
10. Что следует понимать под размером динамической настройки?
11. Какие факторы определяют формирование размера динамической настройки?
12. Что означает понятие «жесткость технологической системы»?
13. Назовите основные пути повышения жесткости технологической системы.
14. От каких факторов зависит величина упругого перемещения на замыкающем звене технологической системы?

15. Какие причины порождают вибрации в технологической системе?
16. Назовите основные мероприятия, способствующие устранению вибраций в технологической системе.
17. Что следует понимать под тепловыми деформациями системы?
18. Назовите основные конструкторские мероприятия, способствующие уменьшению влияния тепловых деформаций на точность обработки.
19. Назовите основные технологические мероприятия, применение которых позволяет уменьшить влияние тепловых деформаций на точность обработки.
20. Назовите три критерия оценки работоспособности режущего инструмента.
21. В чем заключается негативное влияние перераспределения остаточных напряжений на точность обработки?

## Глава 6. УПРАВЛЕНИЕ ТОЧНОСТЬЮ ОБРАБОТКИ НА СТАНКАХ

### 6.1. Настройка и поднастройка технологической системы

Настройкой (наладкой) технологической системы называется процесс первоначального установления требуемой точности относительного положения и движения исполнительных поверхностей станка, приспособления и инструмента с целью получения требуемой точности изготавливаемой детали.

В процессе обработки ряда заготовок достигнутая при первоначальной настройке точность технологической системы постепенно теряется. Причиной этого является совокупное действие систематических факторов, изменяющихся по определенным законам (см. рис. 4.7). В результате получаемые параметры точности детали могут выйти за границу поля допуска. Поэтому, как это видно из точечной диаграммы, при приближении получаемых параметров точности детали к границам поля допуска необходимо повторно восстанавливать первоначальную настройку системы.

Процесс восстановления первоначально достигнутой точности системы называется *поднастройкой (подналадкой)* технологической системы.

Поднастройка может быть периодической и непрерывной. Она может осуществляться вручную или с помощью специально создаваемых автоматических устройств. Так как при размерной настройке и поднастройке достигается требуемая точность замыкающего звена технологической системы, то для их выполнения применяют рассмотренные ранее методы достижения точности замыкающего звена.

#### ***Настройка технологической системы***

Основной задачей настройки технологической системы является достижение требуемой точности изготавливаемых деталей. При этом необходимо так настроить станок, чтобы получить как можно большее количество годных деталей, изготовленных до первой поднастройки.

С этой целью, как это показано на теоретической точечной диаграмме, необходимо правильно разместить возможное поле рассеяния  $\omega_r$ , порождаемое совокупным действием случайных факторов относительно границ установленного поля допуска. Для решения этой задачи

прежде всего необходимо знать, к получению какого численного значения размера необходимо стремиться при выполнении настройки системы. Изготовленная деталь будет являться годной, если полученный на ней размер находится в пределах поля допуска  $A_{\text{нб}} \geq A_{\Delta} \geq A_{\text{нм}}$ . Поэтому в общем случае в результате обработки на годной детали могут быть получены различные размеры в пределах от наибольшего до наименьшего допускаемых размеров.

*Рабочим настроечным размером  $A_p$*  называется размер на детали, к получению которого необходимо стремиться при выполнении настройки технологической системы.

Получение на детали требуемого размера (см. § 5.2) достигается путем задания соответствующего значения размера статической настройки, то есть необходимого расстояния от вершины режущих кромок инструмента до технологической базы. Так как при условии отсутствия погрешности установки, когда  $A_y = 0$ , получаемый на детали размер определяется выражением  $A_{\Delta} = A_c + A_d$ , то для получения на детали требуемого рабочего настроечного размера  $A_p$  необходимо установить размер статической настройки, определяемый согласно формулам (рис. 6.1):

- при точении наружной поверхности:  $A_c = A_p + A_d$ ;
- при расточке отверстия:  $A_c = A_p - A_d$ .

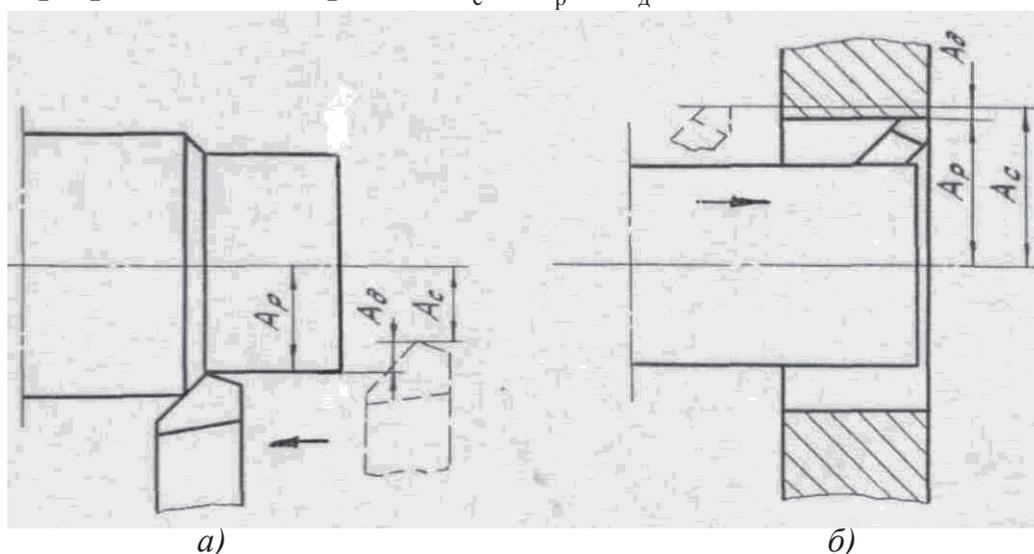


Рис. 6.1. Задание размера статической настройки: *а* – при точении наружной поверхности; *б* – при расточке отверстия

Это означает, что для выполнения размерной настройки станка рабочему необходимо знать ожидаемое значение размера динамической

настройки, которое определяется в основном величиной упругого перемещения на замыкающем звене. При этом необходимо знать не только величину, но и направление формирования упругого перемещения. В этом заключается основная трудность размерной настройки станка, которую рабочий преодолевает на основе своего личного опыта работы.

Для исключения возможности получения брака рабочий выполняет настройку методом пробных проходов. Установив резец в положение, при котором вероятность получения брака минимальна, он выполняет обработку заготовки на коротком участке. После измерения полученного размера при необходимости вносится поправка в статическую настройку и выполняется повторная обработка короткого участка. Этот процесс может повторяться несколько раз до достижения требуемой точности рабочего настроечного размера  $A_{\Delta} = A_p$ . После этого рабочий выполняет обработку заготовки на требуемую длину.

Следует различать настройку станка на изготовление одной детали и на изготовление партии деталей. Рабочие настроечные размеры при настройке на изготовление одной детали и на изготовление партии деталей имеют различные значения.

При настройке системы на изготовление одной детали в качестве рабочего настроечного размера следует выбирать средний размер детали:

$$A_p = A_{cp} = \frac{A_{max} + A_{min}}{2}$$

В этом случае имеет место наилучшее использование поля допуска для компенсации возможных отклонений размера  $A_d$ , которые с равной вероятностью могут расположиться по обе стороны от рабочего настроенного размера  $A_p$ . Вероятность получения бракованной детали при этом минимальна.

### ***Настройка системы для изготовления партии деталей***

Задачей настройки технологической системы для изготовления партии деталей является достижение такого расположения поля рассеяния  $\omega_T$  внутри поля допуска  $T$ , чтобы для компенсации погрешностей, порождаемых систематически действующими факторами, оставалась наибольшая возможная величина допуска (рис. 6.2). Это дает возможность обработать большее количество деталей до очередной поднастройки, что позволяет уменьшить затраты вспомогательного времени и выполнять обработку заготовок более производительно. В этом случае для определения требуемого рабочего настроечного размера необ-

ходимо знать величину ожидаемого мгновенного поля рассеяния  $\omega_T$  и направление его смещения в процессе обработки партии заготовок [6].

Если смещение мгновенного поля рассеяния происходит от наименьшего предельного размера  $A_{\min}$  к наибольшему, как показано на рис. 6.2, а, то для получения как можно большего количества деталей до очередной поднастройки в качестве  $A_p$  выбирают размер, определяемый по формуле

$$A_p = A_{\min} + a + \frac{\omega_T}{2}, \quad (6.1)$$

где  $a$  – часть поля допуска, предназначенная для компенсации постоянной (систематической) погрешности, например погрешности измерения;

$\omega_T$  – мгновенное поле рассеяния, обусловленное действием случайных факторов.

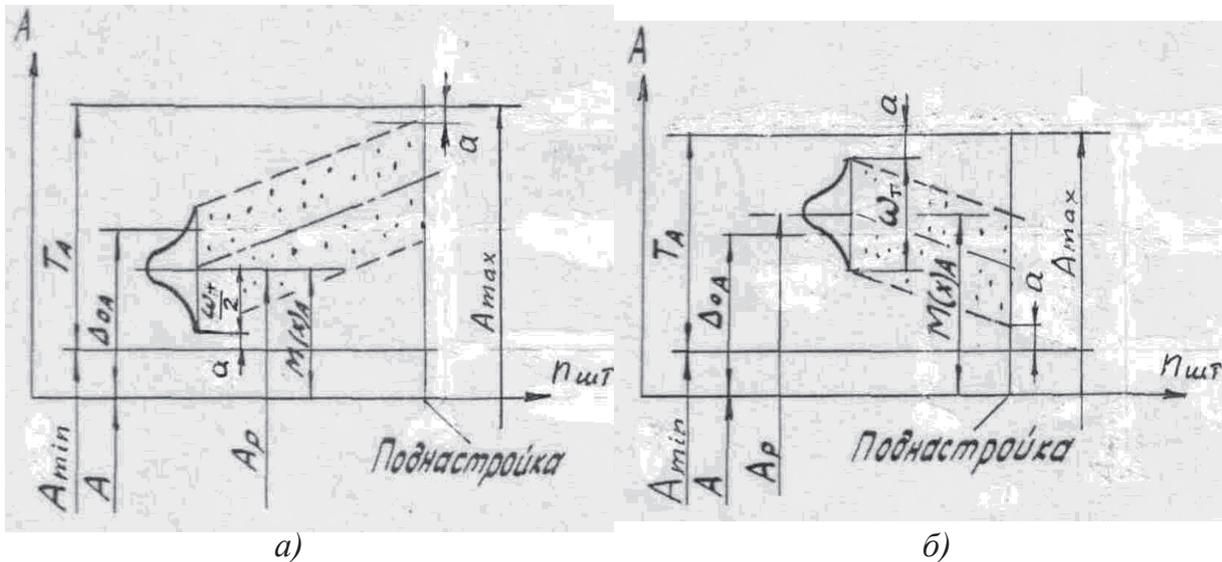


Рис. 6.2. Теоретическая точечная диаграмма получаемых размеров деталей: а – при обработке наружных поверхностей; б – при обработке отверстий

При  $\omega_T = 6\sigma_T$  где  $\sigma_T$  – среднее квадратичное отклонение мгновенного поля рассеяния, получим

$$A_p = A_{\min} + a + 3\sigma_T \quad (6.2)$$

В случае выполнения расточки отверстий, когда смещение мгновенного поля рассеяния происходит от наибольшего предельного размера  $A_{\max}$  к наименьшему (см. рис. 6.2, б), значение рабочего настроечного размера  $A_p$  рассчитывают по формулам:

$$A_p = A_{\max} + a + \frac{\omega_T}{2}, \quad (6.3)$$

или

$$A_p = A_{\max} - a - 3\sigma_T \quad (6.4)$$

Правильную размерную настройку технологической системы на изготовление партии деталей достигают при совмещении координаты середины мгновенного поля рассеяния  $\Delta 0_T = M(x)$  с рабочим настроечным размером (рис. 6.3, а). Поэтому выход на требуемый размер

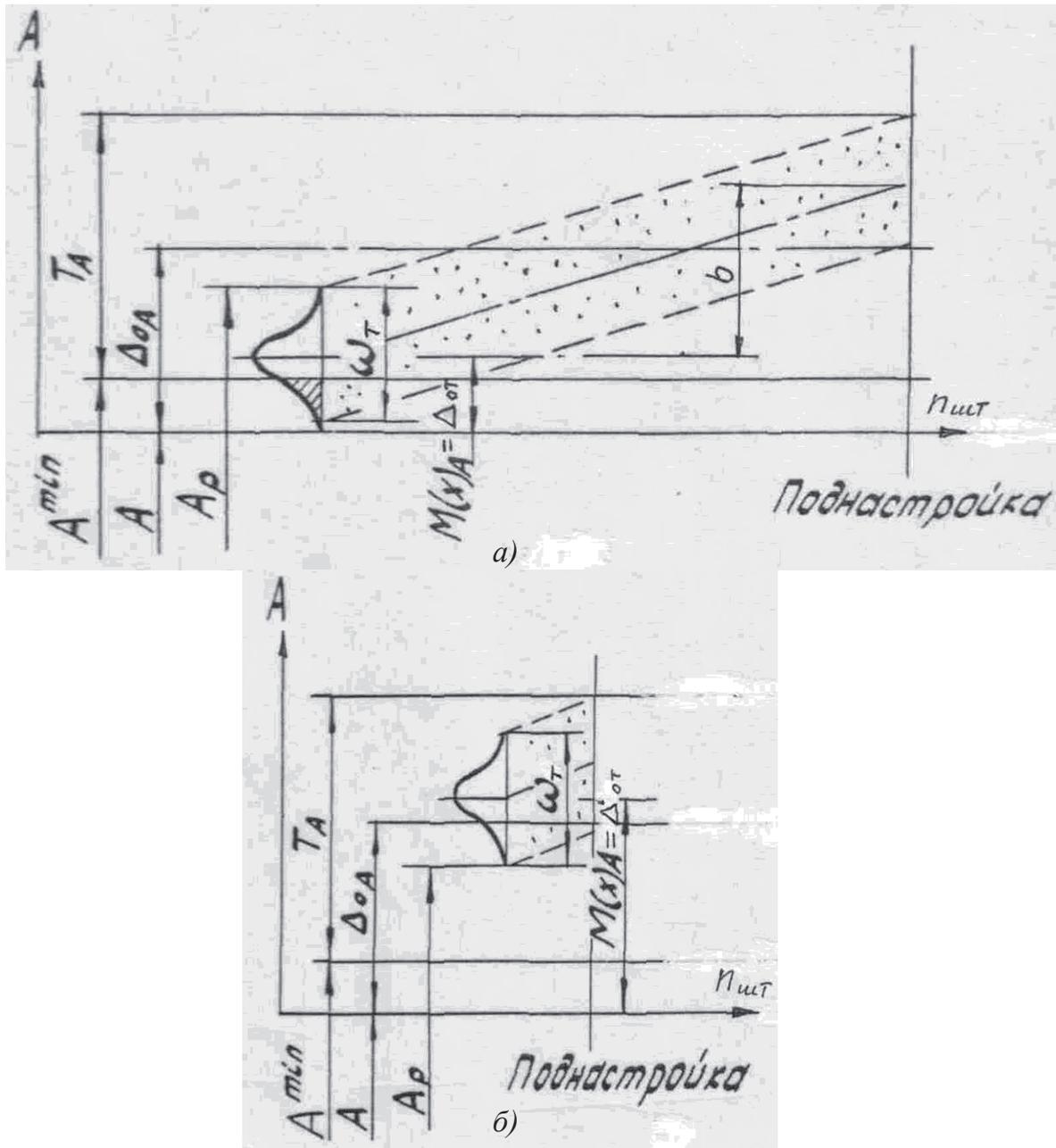


Рис. 6.3. Смещение мгновенного поля рассеяния  $\omega_T$  относительно рабочего настроечного размера: а – в сторону уменьшения получаемых размеров детали; б – в сторону увеличения размеров детали

$A_p$  определяют путем обработки и измерения полученных размеров у группы пробных деталей. По одной пробной детали нельзя достоверно оценить правильность расположения предполагаемого мгновенного поля рассеяния  $\omega_T$  относительно рабочего настроечного размера. Так, например, если мгновенное поле рассеяния  $\omega_T$  будет смещено относительно  $A_p$  в сторону уменьшения размера (см. рис. 6.3, а), то у части полученных деталей размеры могут оказаться за пределами поля допуска, что показывает заштрихованное поле, ограниченное кривой рассеяния и нижней границей поля допуска.

В том случае, когда поле рассеяния  $\omega_T$  смещается относительно  $A_p$  в сторону увеличения получаемого размера (рис. 6.3, б), происходит уменьшение части поля допуска  $b$ , оставляемого для компенсации отклонений, порождаемых действием систематических факторов, изменяющихся по определенному закону:

$$\Delta_b = \Delta'_{от} - \Delta_{от},$$

где  $\Delta_{от}$  и  $\Delta'_{от}$  – соответственно требуемая и увеличенная координаты середины поля рассеяния  $\omega_T$ .

В результате этого до ближайшей поднастройки будет обработано меньшее число заготовок, что приведет к снижению производительности обработки.

Для достоверной оценки положения поля рассеяния  $\omega_T$  относительно размера  $A_p$  необходимо обработать группу пробных заготовок, определить средний групповой размер полученных деталей  $A_{гр.ср}$  и сравнить его с рабочим настроечным размером  $A_p$ . При значении  $A_{гр.ср} < A_p$  размеры у отдельных деталей могут оказаться за пределами нижней границы допуска (см. рис. 6.3, а), а при  $A_{гр.ср} > A_p$  до поднастройки будет получено меньшее число деталей и в целом потребуются выполнение большего числа поднастроек технологической системы (рис. 6.3, б). При нормальном законе рассеяния размеров, получаемых в деталях пробной партии, их среднее квадратичное отклонение  $\sigma_{гр}$  и поле рассеяния  $\omega_{гр}$  составят:

$$\sigma_{гр} = \frac{\sigma_T}{\sqrt{n}}; \omega_{гр} = \frac{6\sigma_T}{\sqrt{n}},$$

где  $\sigma_T$  – среднее квадратичное отклонение ожидаемого поля рассеяния  $\omega_T$ ;  
 $n$  – количество деталей в пробной партии.

В соответствии с этим допускаемые предельные значения групповых средних размеров  $A_{гр.ср}^{нм}$  и  $A_{гр.ср}^{нб}$  (рис. 6.4) можно рассчитать по формулам:

$$A_{гр.ср}^{нм} = A_p + \frac{3\sigma_T}{\sqrt{n}} = A_{\min} + a + 3\sigma_T + \frac{3\sigma_T}{\sqrt{n}};$$

$$A_{гр.ср}^{нб} = A_p + \frac{3\sigma_T}{\sqrt{n}} + \delta_n = A_{\min} + a + 3\sigma_T + \frac{3\sigma_T}{\sqrt{n}} + \delta_n,$$

где  $\delta_n$  – допуск, назначаемый для компенсации погрешности размерной настройки.

Получение группового среднего размера в пределах  $A_{гр.ср}^{нм} \leq A_{гр.ср} \leq A_{гр.ср}^{нб}$  позволяет достаточно достоверно сказать, что исключается появление бракованных деталей и достигается требуемая производительность обработки.

С уменьшением допуска  $\delta_n$ , определяющего точность размерной настройки, сложность выполнения настройки возрастает. В свою очередь, с расширением допуска  $\delta_n$  (см. рис. 6.4) происходит уменьшение части допуска  $b$ , оставляемой для компенсации погрешностей, обусловленных совокупным действием систематических факторов, изменяющихся по определенному закону. Это приводит к необходимости выполнения более частых поднастроек, а следовательно, к снижению производительности обработки.

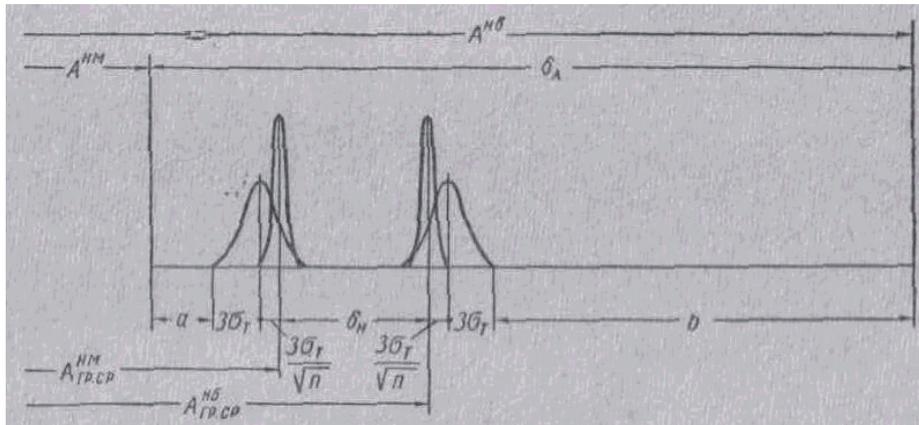


Рис. 6.4. Схема расположения групповых средних размеров

$A_{гр.ср}^{нм}$  и  $A_{гр.ср}^{нб}$

Согласно приведенным формулам (6.1) – (6.4) для упрощения процесса настройки необходимо знать величину предполагаемого мгновенного поля рассеяния размеров  $\omega_T$ . Для быстрого упрощенного определения  $\omega_T$  применяют специальный метод, позволяющий смоделировать колебание припуска в партии обрабатываемых заготовок на одной детали. Изготавливают специальную ступенчатую деталь (рис. 6.5), у которой глубина резания на двух ступенях соответствует величине наи-

меньшего  $t_{\min}$  и наибольшего  $t_{\max}$  возможных припусков. Деталь протачивают на проход, а затем измеряют полученные диаметральные размеры  $D_1, D_2$  и вычисляют ожидаемую величину  $\omega_T$  по формуле

$$\omega_T = D_2 - D_1.$$

Если взять разность полученных размеров  $D_1, D_2$  и диаметра начальной ступени  $D_0$ , по которой происходит касание резца, то можно определить соответственно размеры динамической настройки, возникающие при наименьшей и наибольшей глубинах резания:

$$A_{д1} = 0,5 \cdot (D_1 - D_0); A_{д2} = 0,5 \cdot (D_2 - D_0).$$

Измерение полученных размеров  $D_0, D_1, D_2$  позволяет также выявить размер статической настройки  $A_c$ , по которому произведена настройка системы, и при необходимости внести в него соответствующую коррекцию.

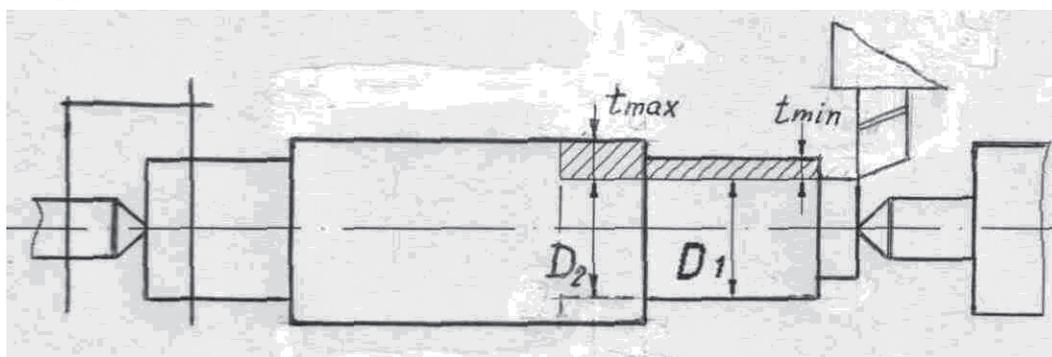


Рис. 6.5. Определение мгновенного поля рассеяния  $\omega_T$  путем точения ступенчатой детали

Определить величины ожидаемого мгновенного поля рассеяния  $\omega_T$  возможно также путем поочередной обработки двух пробных заготовок, размеры которых соответствуют наибольшей и наименьшей величинам припуска на обработку. Систему настраивают на размер методом пробных проходов и выполняют обработку двух подобранных заготовок. Разность полученных диаметральные размеров на двух пробных заготовках достаточно точно определяет величину мгновенного поля рассеяния  $\omega_T$ , обусловленную совокупным действием случайных факторов и в данном случае колебанием припуска.

Настройка технологической системы значительно усложняется при выполнении многоинструментальной обработки с использованием нескольких различных инструментов. Для упрощения настройки и сокращения времени, затрачиваемого на ее выполнение, применяют ранее изготовленную деталь или специально созданный эталон, размеры ко-

торого учитывают ожидаемую величину упругого перемещения. Режущие инструменты доводят рабочими кромками до соответствующих поверхностей детали и закрепляют в державках или рабочих органах оборудования в требуемом положении. Для учета разности значений размера динамической настройки между эталоном и режущей кромкой инструмента может быть установлен щуп соответствующего размера.

Если работа станка осуществляется по упорам, выполняют установку и регулировку положения упоров, определяющих выполнение соответствующих команд циклового управления. Затем эталонную деталь снимают, устанавливают заготовку и выполняют ее обработку с последующим измерением полученных размеров. Инструменты, на которых не обеспечивается достижение требуемых параметров точности детали, подвергают дополнительной регулировке. Этот процесс повторяется до тех пор, пока на детали не будет достигнута требуемая точность по всем получаемым размерам.

#### ***Поднастройка технологической системы***

Поднастройка технологической системы – восстановление первоначальной точности статической настройки станка, нарушенной в процессе обработки вследствие совокупного действия систематических и случайных факторов. Необходимость в поднастройке возникает всякий раз, когда параметры точности получаемой детали (размеры, повороты или шероховатость поверхности) достигают предельно допустимых отклонений (см. рис. 6.2).

В числе основных причин нарушения точности статической настройки находятся систематический износ и затупление режущего инструмента, приводящие к увеличению сил и размера динамической настройки, а также тепловые деформации в технологической системе.

Необходимость непрерывного получения изготавливаемых годных деталей требует правильного определения момента выполнения поднастройки технологической системы. С этой целью выполняют измерения получаемых параметров точности детали. Такие измерения могут выполняться непрерывно у всех полученных деталей, что означает 100 %-ный контроль, или периодически у части деталей, что означает выборочный контроль. Результаты измерения сравнивают с допускаемыми предельными значениями параметров точности детали, на основе чего принимают решение о необходимости выполнения поднастройки системы [2].

Так как отклонение размера каждой отдельной детали представля-

ет собой алгебраическую сумму отклонений, порождаемых действием как систематически действующих, так и случайных факторов, то определение необходимого момента поднастройки по результатам измерения одной детали часто вызывает неопределенность. Более точную информацию о времени выполнения поднастройки можно получить по результатам измерения группы деталей  $A_1, A_2, \dots, A_k$  и расчете группового среднего размера:

$$A_{\text{гр.ср}} = 1/k \cdot (A_1 + A_2 + \dots + A_k),$$

где  $k$  – количество деталей в выборке.

В процессе размерной поднастройки вносится поправка  $\Delta_c$  в первоначально заданный размер статической настройки станка, которая позволяет компенсировать отклонения, обусловленные совокупным действием систематических факторов, изменяющихся по определенному закону (см. рис. 6.2). В результате размерной поднастройки происходит смещение мгновенного поля рассеяния  $\omega_t$  от одной границы поля допуска к другой. Это позволяет исключить получение бракованных деталей, у которых размеры выходят за пределы поля допуска. При выполнении поднастройки необходимо стремиться к тому, чтобы мгновенное поле рассеяния размеров  $\omega_t$  также занимало положение, при котором представляется возможным обработать как можно большее количество заготовок до очередной поднастройки.

В процессе обработки партии заготовок происходит не только размерный износ, но и затупление режущего инструмента, что вызывает систематическое увеличение сил резания. Поэтому, как показано на рис. 6.2, величина мгновенного поля рассеяния размеров в конце обработки партии заготовок возрастает  $\omega_t < \omega_t^{(1)} < \omega_t^{(2)}$  и имеет место изменение угла  $\alpha \neq \alpha_1 \neq \alpha_2$ , характеризующего интенсивность совокупного действия систематических факторов, изменяющихся по определенному закону. В соответствии с этим при выполнении поднастройки необходимо также учитывать возможную коррекцию рабочего настроечного размера  $A_p$ , численное значение которого согласно (6.1) зависит от величины мгновенного поля рассеяния размеров  $\omega_t$ .

В тех случаях, когда продолжительность работы инструмента  $\tau$  достигает и превышает период его расчетной стойкости  $\tau \geq T$ , имеет место повышенный износ и потеря режущей способности инструмента. В результате выполняют замену режущего инструмента и размерную поднастройку станка. На станках автоматах и полуавтоматах режущий ин-

струмент обычно заранее выставляют на требуемый размер вне станка, что позволяет существенно уменьшить продолжительность поднастройки станка.

## **6.2. Автоматический контроль точности деталей на рабочем месте**

Для измерения на станке достигнутых при обработке показателей точности детали и получения информации, обеспечивающей возможность управления точностью, на станках создают специальные информационно-измерительные системы. На станках-автоматах и полуавтоматах, постоянно выполняющих одну операцию, например бесцентровое шлифование, круглое наружное или внутреннее шлифование, с этой целью применяют системы активного контроля, осуществляющие контроль одного размера с помощью измерительных скоб или других устройств. Постоянный автоматический контроль получаемого диаметрального размера детали на круглошлифовальном или на внутришлифовальном станках позволяет управлять циклом работы станка и оценить точность полученного на детали размера. На первом этапе процесса обработки происходит предварительное шлифование и при достижении на детали определенного размера с датчика системы активного контроля подается команда на изменение режима обработки и переход на второй этап – чистовое шлифование. При достижении на детали определенного размера по команде с датчика происходит окончание чистового шлифования и переход на последний этап шлифования – выхаживание. На этом этапе процесс шлифования осуществляется без радиальной подачи абразивного круга за счет упругого натяга, созданного в технологической системе. Команда на окончание шлифования поступает от датчика системы активного контроля при получении на детали требуемого диаметрального размера.

На станках с ЧПУ, и в частности на многоцелевых станках фрезерно-расточного или токарного типа, выполняющих различные технологические переходы по обработке наружных и внутренних, плоских и цилиндрических поверхностей, для автоматического контроля применяют системы с использованием измерительных щупов (измерительных головок). Такие системы обеспечивают измерение отклонений различных линейных, диаметральных и угловых размеров. Измерительный щуп системы помещают в одной из позиций инструментального ма-

газина, и при необходимости контроля отклонений он автоматически устанавливается в шпиндель станка (рис. 6.6).

Оснащение многоцелевых станков измерительными системами обеспечивает возможность:

- осуществления автоматического контроля на станке и проведения соответствующей коррекции по результатам измерения;
- реализации на станке гибких технологических циклов, направленных на достижение требуемой точности детали с учетом возникающих в технологической системе отклонений;
- получения информации о точности установки на станке детали и спутника, о точности установки режущего инструмента, и его размерном износе;
- определения фактических размеров заготовки для автоматического определения числа рабочих ходов и соответствующих режимов обработки.

Измерительный щуп может быть одно-, двух- или трехкоординатного исполнения с электромеханическим или оптическим преобразователем, фиксирующим момент контакта измерительного наконечника с деталью, или с измерительным датчиком, непосредственно определяющим отклонение в измеряемой точке. В первом случае для оценки отклонений используют измерительную систему ЧПУ станка. В момент контакта измерительного наконечника с деталью от щупа по беспроводным каналам связи поступает команда на остановку движения станка. Для осуществления беспроводной связи съемного щупа с системой создают специальные каналы оптической или радиосвязи. Достигнутое относительное положение рабочих органов фиксируют путем считывания данных с соответствующих датчиков системы ЧПУ.

Схема конструкции измерительного щупа фирмы «Heidenhain» с

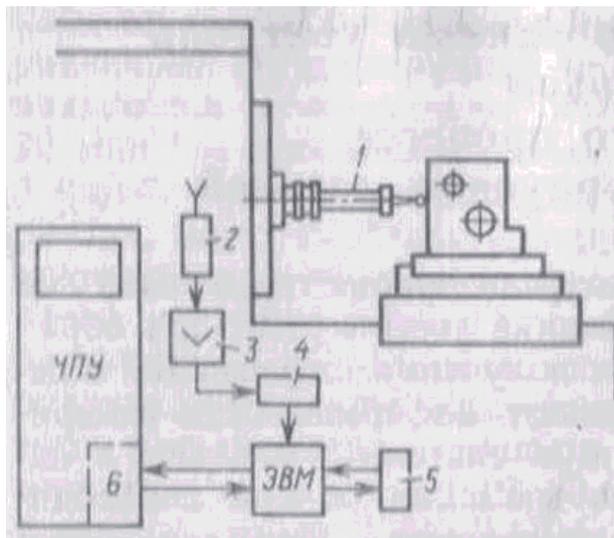


Рис. 6.6. Система автоматизированного контроля на многоцелевом станке: 1 – измерительный щуп; 2 – приемник сигнала; 3 – усилитель; 4 – модуль связи; 5 – блок ввода-вывода; 6 – блок сопряжения с ЧПУ станка

оптическим преобразователем представлена на рис. 6.7. Измеритель-

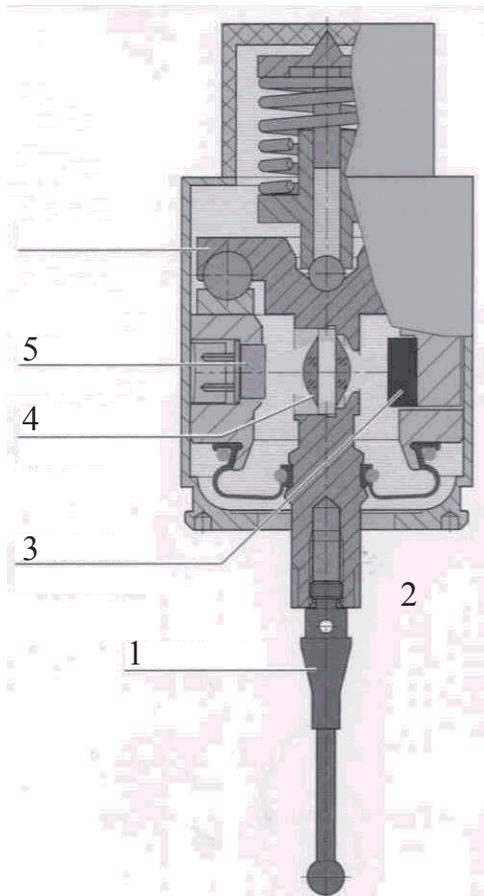


Рис. 6.7. Схема конструкции измерительного щупа

ный наконечник 1, расположенный на шарнирной подвеске 4, соединен с системой линз 3, на которую от источника 4 направлен световой поток. Незначительные отклонения наконечника в момент контакта с деталью приводят к смещению линз и к изменению светового потока, что фиксирует дифференциальный фотоэлемент 5.

Процесс измерения выполняется по определенному циклу, предусмотренному в программе станка. При этом измеряют координаты отдельных характерных точек обработанной поверхности детали и путем расчета на управляющей ЭВМ по заложенным алгоритмам определяют достигнутые показатели точности детали. С этой целью различают плановые координаты  $x_i$ ,  $y_i$ ,  $z_i$  характерных точек, которые определяют расположение точек

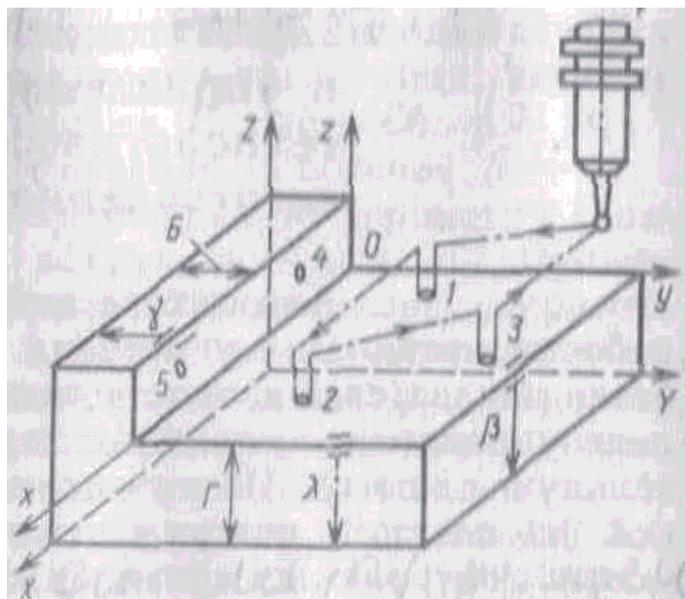


Рис. 6.8. Измерения достигнутой точности размеров и относительных поворотов поверхностей обработанной призматической детали

на контролируемой поверхности, и нормальные координаты  $\Delta x_i$ ,  $\Delta y_i$ ,  $\Delta z_i$  точек, которые характеризуют отклонение точек по нормали к измеряемой поверхности [18].

На рис. 6.8 представлена схема измерения достигнутой точности расстояния и поворота обрабатываемой поверхности (система  $oxyz$ ) относительно технологической базы (система  $OXYZ$ ). Для определения

точности расстояния и отклонений относительного поворота плоской поверхности измерения производят поочередно в трех точках 1, 2, 3. Среднее отклонение размера  $\Delta_\Gamma$ , получаемое по трем точкам измерения, составит:

$$\Delta_\Gamma = 1/3 \cdot (\Delta z_1 + \Delta z_2 + \Delta z_3),$$

где  $\Delta z_2, \Delta z_3$  – отклонения размера  $\Gamma$  в точках измерения.

Отклонения относительного поворота составят:

– в плоскости  $XOZ$ :

$$\Delta\beta = (\Delta z_2 - \Delta z_1) / (x_2 - x_1) \text{ при } y_1 = y_2;$$

– в плоскости  $YOZ$ :

$$\Delta\lambda = (\Delta z_3 - \Delta z_1) / (y_3 - y_1) \text{ при } x_1 = x_3,$$

где  $(x_1, y_1), (x_2, y_2), (x_3, y_3)$  – плановые координаты в точках измерения.

Для определения отклонения ширины бурта  $B$  и погрешности поворота  $\gamma$  плоскости  $xoz$  относительно направляющей базы измерения выполняют в двух точках 4 и 5. Отклонения размера  $\Delta_B$  и относительного поворота  $\Delta\gamma$  при этом соответственно составят:

$$\Delta_B = 1/2 \cdot (\Delta y_4 + \Delta y_5),$$

$$\Delta\gamma = (\Delta y_5 - \Delta y_4) / (x_5 - x_1) \text{ при } z_4 = z_5,$$

где  $x_4, x_5$  – плановые координаты точек измерения;

$\Delta y_4, \Delta y_5$  – отклонения размера в точках измерения.

Отклонения показателей точности обрабатываемой заготовки рассчитывают с помощью микропроцессора, компенсируются путем автоматической коррекции программ последующих чистовых проходов. Коррекция погрешности относительного поворота возможна при наличии в технологической системе компенсирующих звеньев, например поворотных столов глобусного типа. При использовании измерительных систем следует учитывать, что точность измерения на станке несколько ниже, чем на координатно-измерительной машине, так как она не превышает фактическую точность позиционирования рабочих узлов станка с ЧПУ; продолжительность цикла обработки детали на станке увеличивается в связи с последовательным включением контрольных переходов.

Для измерения точности положения центра отверстия в направлении одной из координат, например  $OZ$ , измерения выполняют в двух точках 1 и 2 (рис. 6.9, а). Положение центра отверстия составит

$$\Delta_\Gamma = 1/2 \cdot (\Delta z_1 + \Delta z_2).$$

При необходимости определения положения центра отверстия в

двух направлениях  $OZ$  и  $OX$  (рис. 6.9, б) измерения проводят в четырех точках:

$$\begin{vmatrix} \Delta_{\Gamma} \\ \Delta_A \end{vmatrix} = 0,5 \cdot \begin{vmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} \Delta_{z_1} \\ \Delta_{z_2} \\ \Delta_{x_3} \\ \Delta_{x_4} \end{vmatrix}.$$

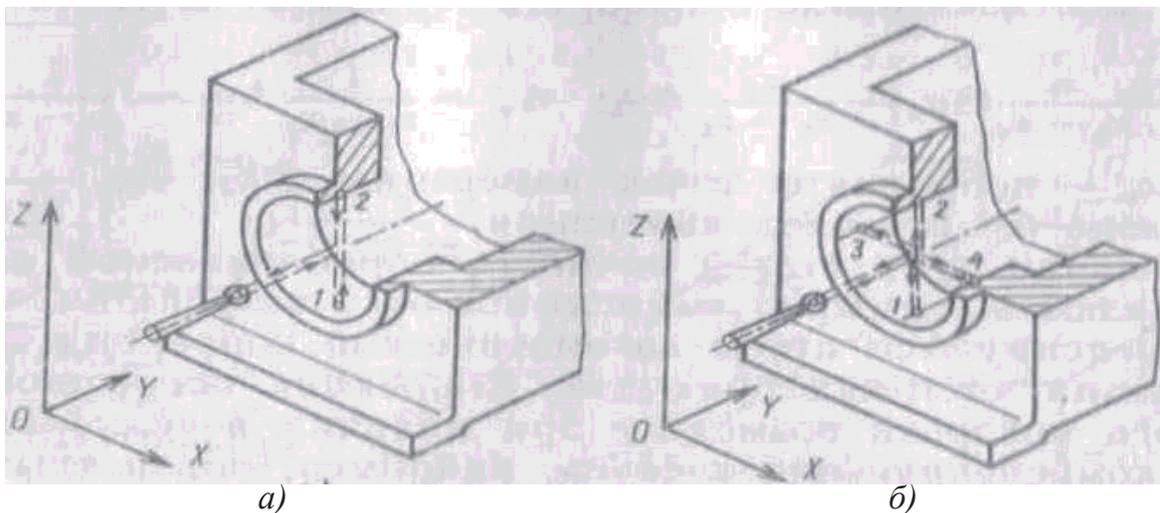


Рис. 6.9. Измерения параметров точности отверстия: а – в одном координатном направлении; б – в двух координатных направлениях

Измерение отклонений в четырех точках позволяет оценить также точность диаметрального размера и погрешность геометрической формы отверстия в поперечном сечении. Значения диаметральных размеров составят:

- в направлении  $OX$   $D_x = \Delta x_4 - \Delta x_3$ ;
- в направлении  $OZ$   $D_z = \Delta z_2 - \Delta z_1$ .

В свою очередь, погрешность геометрической формы отверстия:  $\omega_{\phi} = D_x - D_z$  при  $D_x \geq D_z$  или  $\omega_{\phi} = D_z - D_x$  при  $D_z \geq D_x$ .

Применение на станке измерительной системы с использованием сканирующего щупа позволяет оценить достигнутую точность сложноконтурной и объемной поверхностей. Схема измерения трехкоординатным щупом геометрической точности объемной поверхности представлена на рис. 6.10.

Отклонения положения точек поверхности  $\Delta z_i$  в заданной системе координат представляются при этом как массив цифровых данных  $(\Delta z_1, x_1, y_1; \dots; \Delta z_i, x_i, y_i; \dots; \Delta z_k, x_k, y_k)$ , где  $k$  – количество задаваемых точек измерения.

Автоматизация выполнения контрольных операций на рабочей по-

зиции позволяет создавать технологические циклы управления станком, при которых гарантированно достигается требуемая точность обработки детали. Новый подход к построению технологических циклов предусматривает включение в управляющую программу описанных выше метрологических переходов по оценке достигнутой точности деталей. В этом случае метрологические переходы включают в программу после выполнения предварительной обработки непосредственно перед выполнением чистовой обработки детали.

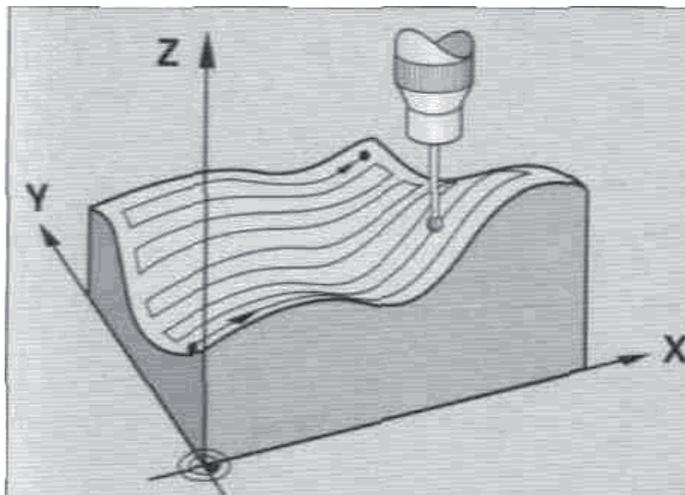


Рис. 6.10. Схема измерения геометрической точности фасонной поверхности

### **6.3. Управление точностью на этапе установки и статической настройки**

Если на обычных станках и на станках с ЧПУ, обслуживаемых рабочим, функции управления и контроля за ходом процесса выполняет рабочий, то на многоцелевых станках в гибких производственных системах (ГПС), работающих в режиме безлюдной технологии, эти задачи решаются с помощью систем управления. Сюда входят управление точностью установки, коррекция статической настройки в исходном положении и по результатам измерения детали, управление режимами на различных переходах и оценка состояния режущего инструмента на станке. Это означает комплексное управление размерными связями гибких технологических систем на этапах достижения точности.

Необходимость управления в процессе обработки требует создания на базе микропроцессорной техники автоматических систем, реализующих принципы адаптивного управления на различных этапах достижения точности, включая установку, статическую и динамическую настройку оборудования. Для решения этих технологических задач на станках с ЧПУ применяют специально создаваемые информационно-измерительные системы, которые представляют собой отдельные функциональные блоки компьютерной системы ЧПУ (CNC) [19, 23].

Состав и последовательность переходов, выполняемых такой системой для достижения точности обработки на многоцелевом станке, показаны на рис. 6.11. На основе результатов измерения полученной точности детали в размеры статической настройки, заданные в управляющей программе станка, вводится соответствующая коррекция. Алгоритм работы системы определяют три основных модуля. Переходы модуля I составляют программу измерений, выполняемых на станке с помощью измерительного щупа. По окончании этой программы получают данные об отклонении нормальных координат  $\Delta x_i, \Delta y_i, \Delta z_i$  в заданных точках измерения. Переходы модуля II образуют программу расчета отклонений параметров точности детали или параметров ее положения на основе полученных числовых значений нормальных и плановых координат точек измерения.

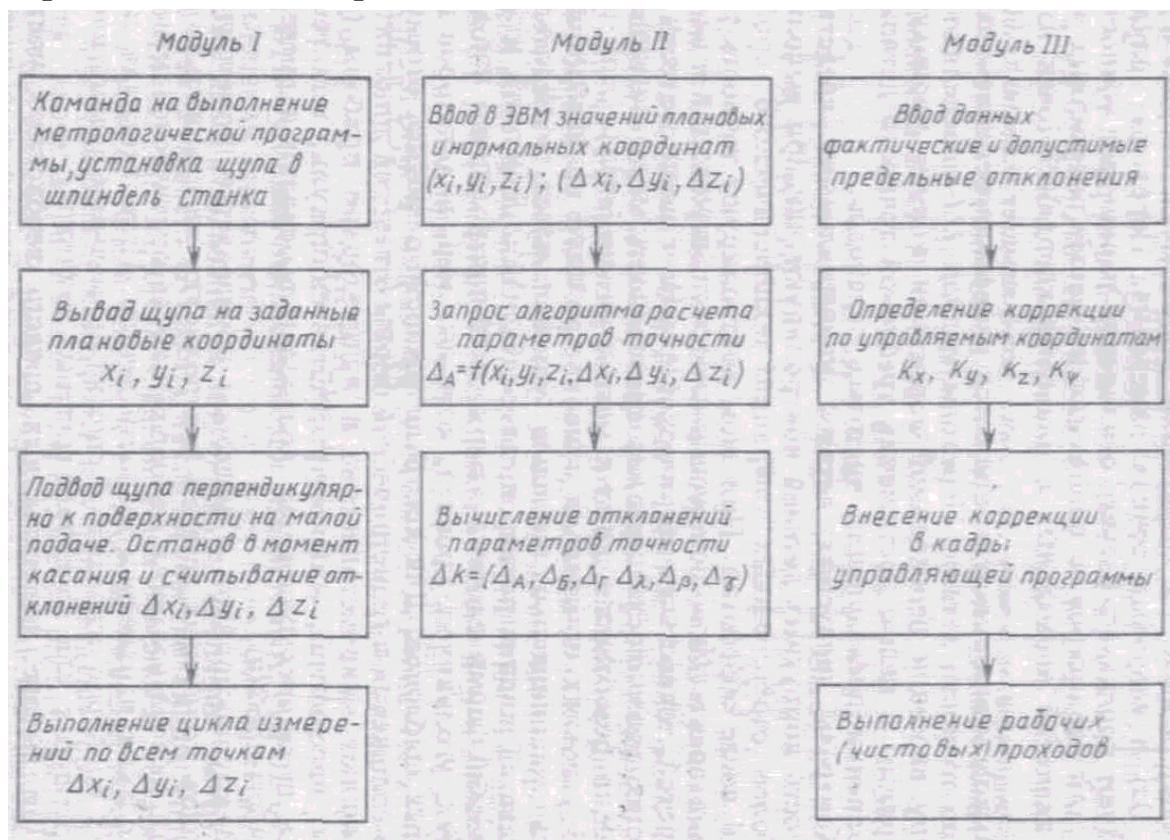


Рис. 6.11. Состав и последовательность переходов, выполняемых при автоматическом контроле параметров точности детали и коррекции управляющей программы на станках с компьютерной системой ЧПУ (CNC)

Выходом этого модуля являются измерения отклонений параметров точности детали. Переходы модуля III определяют процедуру внесения необходимой коррекции в текст управляющей программы с це-

люю достижения требуемой точности детали при выполнении последующих чистовых переходов.

Создание систем автоматического управления точностью установки заготовок и спутников на станках необходимо в тех случаях, когда отклонения, формируемые на этапе установки, не позволяют обеспечить высокую точность обработки деталей. Принцип работы таких систем заключается в измерении составляющих вектора погрешности установки  $\omega_y$  и внесения соответствующей коррекции в управляющую программу для компенсации отклонений. Автоматическая оценка фактической точности положения спутника и заготовки на рабочей позиции многоцелевого станка осуществляется с помощью измерительного щупа (измерительной головки). Перед обработкой, после установки заготовки или спутника на рабочую позицию станка, щуп из позиции инструментального магазина автоматически устанавливается в шпиндель станка для выполнения измерений. Процесс измерения выполняется по определенному циклу, заложенному в управляющей программе. Для определения всех шести параметров вектора погрешности установки  $\omega_y = (a_y, b_y, c_y, \lambda_y, \beta_y, \gamma_y)$  в общем случае необходимо выполнять измерения в шести точках.

На рис. 6.12 представлена схема измерения точности пространственного положения спутника с заготовкой при установке его на рабочую позицию станка. Измерения выполняются последовательно в шести контрольных точках. Участки расположения контрольных точек на

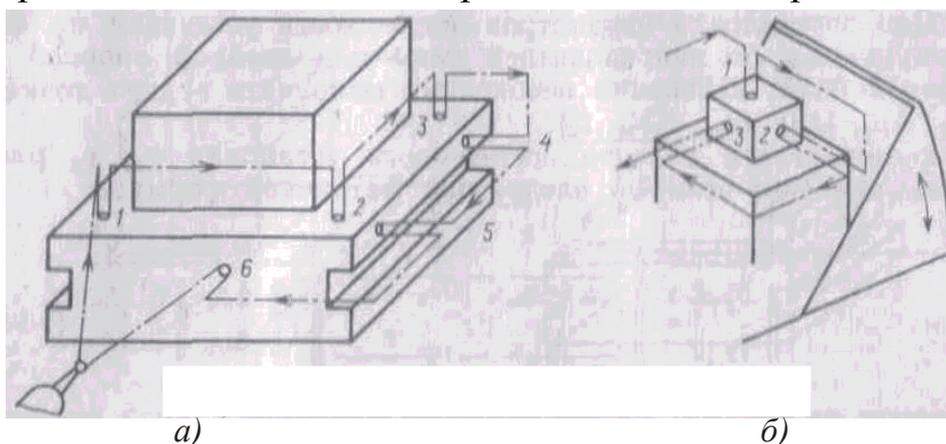


Рис. 6.12. Измерение точности пространственного положения спутника на столе станка: *a* – по шести контрольным точкам; *б* – по трем контрольным точкам

спутнике выбирают заранее. При этом предусматривают меры защиты, исключающие их повреждение.

Параметры погрешности установки спутника  $c_y$ ,  $\lambda_y$ ,  $\beta_y$ , формируемые по установочной базе, на которой располагаются три теоретические опорные точки, определяют согласно матричному выражению:

$$\begin{vmatrix} c_y \\ \lambda_y \\ \beta_y \end{vmatrix} = \frac{1}{C} \begin{vmatrix} (x_2y_3 - x_3y_2) & (x_3y_1 - x_1y_3) & (x_1y_2 - x_2y_1) \\ (x_3 - x_2) & (x_1 - x_3) & (x_2 - x_1) \\ (y_3 - y_2) & (y_1 - y_3) & (y_2 - y_1) \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} \Delta z_1 \\ \Delta z_2 \\ \Delta z_3 \end{vmatrix} \quad (6.5)$$

где  $C$  – определитель:  $C = \begin{vmatrix} 1 & y_1 & -x_1 \\ 1 & y_2 & -x_2 \\ 1 & y_3 & -x_3 \end{vmatrix}$

В приведенном выражении координаты  $(x_1, y_1)$ ,  $(x_2, y_2)$ ,  $(x_3, y_3)$  определяют положение точек измерения на установочной базе спутника (плоскость  $XOY$ ), а  $\Delta z_1$ ,  $\Delta z_2$ ,  $\Delta z_3$  представляют собой отклонения, фиксируемые измерительным щупом в точках измерения.

Таким образом, для оценки трех параметров погрешности установки  $c_y$ ,  $\lambda_y$ ,  $\beta_y$ , формируемых по установочной базе, измерения необходимо выполнять в трех точках 1, 2, 3. При этом для повышения точности измерения желательно программировать расположение точек с наибольшим удалением их друг от друга по площади контролируемой поверхности.

Для определения параметров погрешности установки  $b_y$ ,  $\gamma_y$ , формируемых от направляющей базы или двойной опорной и опорной базы, измерения необходимо выполнять в двух точках 4, 5 (плоскость  $XOZ$ ). Составляющие вектора погрешности установки  $b_y$ ,  $\gamma_y$  рассчитывают при этом по матричной формуле:

$$\begin{vmatrix} b_y \\ \gamma_y \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} -\frac{x_5}{x_5 - x_4} & \frac{x_4}{x_5 - x_4} \\ 1 & 1 \\ -\frac{x_5}{x_5 - x_4} & \frac{x_4}{x_5 - x_4} \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} \Delta y_4 \\ \Delta y_5 \end{vmatrix}, \quad (6.6)$$

где  $x_4$ ,  $x_5$  – координаты точек измерения;

$\Delta y_4$ ,  $\Delta y_5$  – отклонения размеров в точках измерения.

Для оценки параметра погрешности установки  $a_y$ , формируемого от опорной базы (плоскость  $YOZ$ ), на которой располагается одна теоретическая опорная точка, измерения необходимо выполнять в одной точке 6. При этом составляющая погрешности установки  $a_y = \Delta x_6$ .

С целью упрощения цикла измерения точность положения спутника оценивают по результатам измерения не шести, а меньшего числа точек. Однако при этом невозможно определить все шесть параметров вектора  $\omega_y$ . На рис. 6.12, б дана схема измерения по трем точкам. На краю спутника установлен куб с измерительными базами, который защищен кожухом. Такая схема измерения позволяет оценить положение спутника в направлении трех координатных осей без учета угловых отклонений  $\lambda_y, \beta_y, \gamma_y$ :

$$a_y^* = \Delta x_3, \quad b_y^* = \Delta y_2, \quad c_y^* = \Delta z_1.$$

При необходимости получения оценки положения спутника только по высоте  $c_y$  измерение выполняют в точке 1 по одной координате  $c_y = \Delta z_1$ .

Аналогичным образом представляется возможным оценить точность установки заготовки непосредственно на станке или спутнике. Схемы измерения пространственной точности положения заготовок на спутниках многоцелевых станков представлены на рис. 6.13. Такие измерения могут быть выполнены с помощью измерительной головки непосредственно на рабочей позиции станка перед обработкой или на координатно-разметочной машине в процессе точной установ-

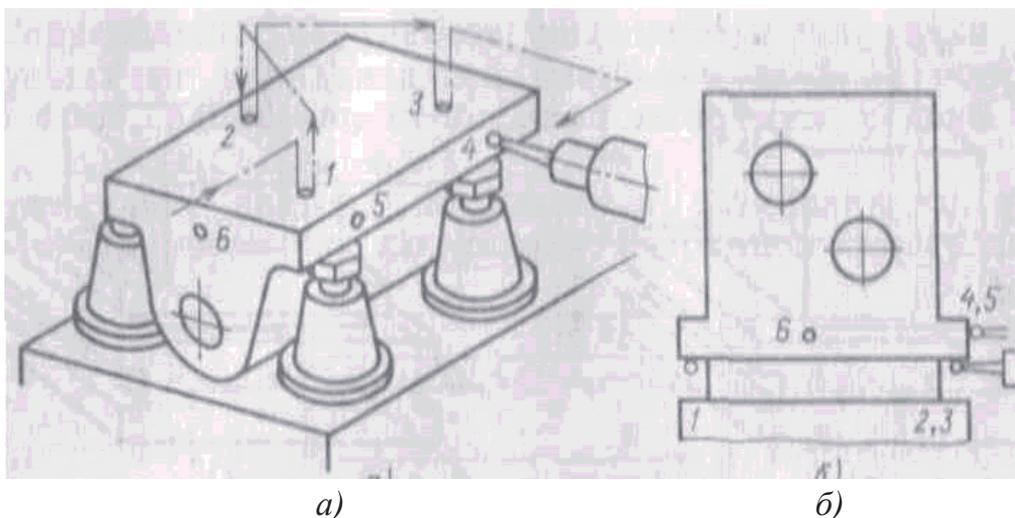


Рис. 6.13. Измерение точности положения заготовки корпусной детали на многоцелевом станке: а – базирование заготовки на винтовых упорах; б – базирование заготовки на подкладной плите (адаптере)

ки заготовки на спутнике. Оценка параметров вектора  $\omega_y$  погрешности установки заготовки непосредственно на станке позволяет при необходимости внести коррекцию в соответствующие кадры управляющей программы для гарантированного достижения требуемой точности де-

тали в процессе обработки. Необходимость этого возникает в первую очередь при обработке наиболее ответственных поверхностей с жесткими техническими требованиями.

При установке заготовки на спутнике с использованием координатно-разметочной машины регулировка винтовых упоров (рис. 6.13, а) позволяет уменьшить составляющие вектора  $\omega_y$ , обеспечив требуемую точность положения заготовки на спутнике.

Приведенная выше формула для расчета составляющих вектора погрешности установки спутников и заготовок может быть использована для расчета составляющих вектора погрешности установки как при базировании в координатный угол, так и при базировании по плоскости и двум базовым отверстиям.

Допустимые параметры погрешности установки спутников, а также допустимые значения их деформаций в процессе установки заготовок и закрепления самих спутников на станках определяют исходя из требований точности изготовления деталей на соответствующих операциях. Погрешности, возникающие на этом этапе установки, непосредственно приводят к формированию отклонений размеров установки и к отклонениям припусков на обрабатываемых поверхностях.

Погрешности геометрической формы контактируемых базовых поверхностей заготовок и спутников, а также отклонения, возникающие при приложении силового замыкания, определяют формирование различных значений погрешности установки:

$$\omega_y^H \leq \omega_y \leq \omega_y^B.$$

Это означает, что составляющие вектора погрешности установки могут изменяться в пределах:

$$- \text{от верхнего } \omega_y^B = (a_y^B, b_y^B, c_y^B, \lambda_y^B, \beta_y^B, \gamma_y^B); \quad (6.7)$$

$$- \text{до нижнего } \omega_y^H = (a_y^H, b_y^H, c_y^H, \lambda_y^H, \beta_y^H, \gamma_y^H) \quad (6.8)$$

значения отклонений. Наиболее вероятными значениями являются их математические ожидания:

$$m(\omega_y) = [m(a_y), m(b_y), m(c_y), m(\lambda_y), m(\beta_y), m(\gamma_y)].$$

В соответствии с этим отклонения размеров установки также изменятся в диапазоне от верхних до нижних предельных значений.

Ниже приведены формулы, связывающие предельные отклонения размеров установки  $\Delta L_{z_y}$ ,  $\Delta L_{y_y}$ ,  $\Delta L_{x_y}$ , формируемые соответственно от трех базирующих поверхностей, с предельными значениями параметров вектора  $\omega_y$  и габаритными размерами рассматриваемых поверхностей  $x$ ,  $y$ ,  $z$ .

Для размера установки  $L_{Zy}$ , образуемого от установочной базы (плоскость  $XOY$ , рис. 6.14):

$$\begin{vmatrix} \Delta_{L_{Zy}}^B \\ \Delta_{L_{Zy}}^H \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} c_y^B \\ c_y^H \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} -\beta_y^H & \lambda_y^B \\ -\beta_y^H & \lambda_y^B \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} x \\ y \end{vmatrix}, \quad (6.9)$$

где  $c_y^B$ ,  $\lambda_y^B$ ,  $\beta_y^B$  и  $c_y^H$ ,  $\lambda_y^H$ ,  $\beta_y^H$  – соответственно верхние и нижние предельные значения составляющих вектора погрешности установки, формируемые на установочной базе.

Для размера установки  $L_{Yy}$ , образуемого от направляющей базы

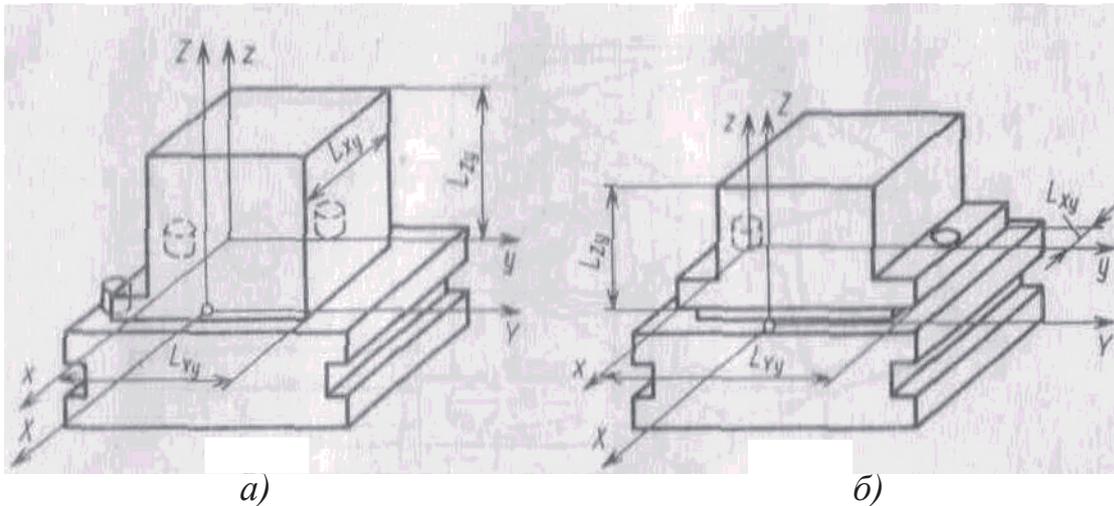


Рис. 6.14. Схемы к определению отклонений размеров установки при различных вариантах базирования заготовок на спутниках: *a* – базирование заготовки в координатный угол; *б* – базирование заготовки по плоскости и двум базовым отверстиям

(плоскость  $XOZ$ , рис. 6.14, *a*):

$$\begin{vmatrix} \Delta_{L_{Yy}}^B \\ \Delta_{L_{Yy}}^H \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} b_y^B \\ b_y^H \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} \gamma_y^H & -\lambda_y^B \\ \gamma_y^H & -\lambda_y^B \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} x \\ z \end{vmatrix}, \quad (6.10)$$

где  $b_y^B$ ,  $\gamma_y^B$  и  $b_y^H$ ,  $\gamma_y^H$  – предельные значения составляющих погрешности установки, формируемые на направляющей базе;  $\lambda_y^B$ ,  $\lambda_y^H$  – составляющие погрешности установки, формируемые на установочной базе.

Для размера установки  $L_{Xy}$ , образуемого от опорной базы (плоскость  $YOZ$ , рис. 6.14, *a*):

$$\begin{vmatrix} \Delta_{L_{Xy}}^B \\ \Delta_{L_{Xy}}^H \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} a_y^B \\ a_y^H \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} -\gamma_y^H & \beta_y^B \\ -\gamma_y^H & \beta_y^B \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} x \\ z \end{vmatrix}, \quad (6.11)$$

где  $a_y^B$ ,  $a_y^H$  – предельные составляющие погрешности установки, формируемые на опорной базе;  $\beta_y^B$ ,  $\beta_y^H$  – составляющие погрешности, форми-

руемые на установочной базе;  $\gamma_y^B, \gamma_y^H$  – составляющие погрешности установки, формируемые на направляющей базе.

Приведенные выражения (6.9) – (6.11) показывают, что отклонение размера установки, образуемого от установочной базы  $\Delta L_{Zy}$ , определяется тремя составляющими погрешности установки  $c_y, \lambda_y, \beta_y$ , формируемыми на установочной базе. В свою очередь, отклонение размера установки, образуемого от направляющей базы  $\Delta L_{Yy}$ , зависит от двух составляющих погрешности установки  $b_y, \gamma_y$ , формируемых на направляющей базе, и погрешности относительного поворота  $\lambda_y$ , возникающей на установочной базе. Отклонение размера установки, образуемого от опорной базы, зависит от параметра смещения  $a_y$ , формируемого на этой базе, и двух угловых отклонений  $\beta_y$  и  $\gamma_y$ , формируемых соответственно на установочной и на направляющей базах.

При базировании заготовок или спутников по плоскости и двум отверстиям (рис. 6.14, б) предельные отклонения размеров установки, образуемых от двойной опорной базы в двух координатных направлениях, соответственно составляют:

– для размера установки  $L_{Xy}$  в направлении оси  $OX$

$$\begin{vmatrix} \Delta_{L_{Xy}}^B \\ \Delta_{L_{Xy}}^H \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} a_y^B \\ a_y^H \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} -\gamma_y^H & \beta_y^B \\ -\gamma_y^H & \beta_y^B \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} y \\ z \end{vmatrix};$$

– для размера установки  $L_{Yy}$  в направлении оси  $OY$

$$\begin{vmatrix} \Delta_{L_{Yy}}^B \\ \Delta_{L_{Yy}}^H \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} b_y^B \\ b_y^H \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} \gamma_y^H & -\lambda_y^B \\ \gamma_y^H & -\lambda_y^B \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} x \\ z \end{vmatrix},$$

где  $a_y^B, a_y^H$  и  $b_y^B, b_y^H$  – предельные отклонения составляющих погрешности установки, формируемых на двойной опорной базе;

$\lambda_y^B, \lambda_y^H$  и  $\beta_y^B, \beta_y^H$  – составляющие погрешности установки, формируемые на установочной базе;

$\gamma_y^B, \gamma_y^H$  – составляющие погрешности установки, формируемые на опорной базе.

Рассчитав фактические значения параметров вектора погрешности установки и отклонения размеров установки, формируемые от технологических баз, можно внести соответствующую коррекцию в управляющую программу станка для достижения требуемой точности обрабатываемой детали. Выполнение таких расчетов и внесение соответствующей коррекции в управляющую программу изготовления дета-

ли на многоцелевом станке осуществляется при наличии микропроцессорной системы управления станком.

***Коррекция статической настройки в исходном положении по результатам оценки точности установки инструмента, детали и спутника***

На автоматизированных участках многоцелевые станки работают в заранее запрограммированном жестком автоматическом цикле, в процессе которого отсутствует контроль и компенсация отклонений при выполнении каждого из этапов достижения точности обрабатываемой детали. Такие станки постоянно работают в режиме автоматической перенастройки с обработки детали одного типоразмера на другой.

Для получения на станках с ЧПУ и многоцелевых станках требуемой точности обработки уже на первых деталях каждой новой партии необходимо обеспечить равенство фактически получаемых размеров статической настройки и размеров, заданных в управляющей программе. Это равенство размеров зависит от сохранения первоначальной точности положения режущих кромок инструмента и баз станка относительно начала отсчета. Для этого необходимо компенсировать погрешность статической настройки, получаемую в результате размерного износа режущего инструмента и температурного деформирования технологической системы, а также в результате замены режущего инструмента, спутника с деталью и перемещения рабочих органов в новое исходное положение.

Решение этой задачи достигается с помощью автоматических систем, обеспечивающих коррекцию точности статической настройки в исходном положении. Принципиальная схема системы автоматической коррекции представлена на рис. 6.15. С помощью измерительного устройства 1, состоящего из одного или нескольких датчиков, измеряется точность положения вершины режущей кромки инструмента и баз станка относительно начала отсчета размеров. Измерение точности относительного положения производится перед обработкой очередной партии деталей, при этом рабочие органы станка находятся в исходном положении или выводятся по программе в определенную контрольную позицию. Информация о точности статической настройки с измерительного устройства поступает в блок коррекции 3, туда же с задающего устройства 2 подается сигнал о требуемой точности статической настройки. Получаемый в результате сравне-

ния сигнал рассогласования, соответствующий погрешности статической настройки, подается в блок ЧПУ 4. В соответствии со значением

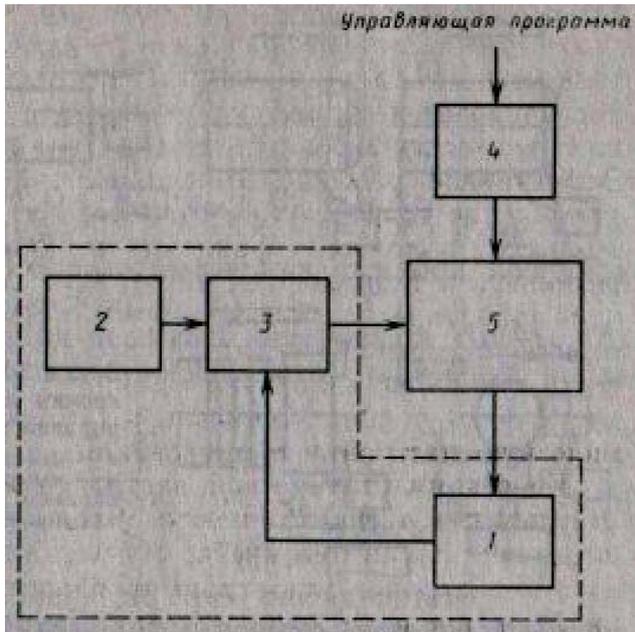


Рис. 6.15. Структурная схема системы автоматической коррекции статической настройки в исходном положении

рассогласования в блоке ЧПУ производится автоматическая коррекция управляющей программы. Таким образом, все последующие детали обрабатываются по откорректированной программе. Последняя учитывает погрешность статической настройки, обусловленную размерным изнашиванием режущего инструмента, температурным деформированием технологической системы 5 и другими факторами, вызывающими изменение положения режущих кромок инструмента и баз станка отно-

сительно начала отсчета.

Коррекцию статической настройки в исходном положении необходимо производить при перенастройке станка непосредственно перед обработкой первой детали очередной партии. Именно на этом этапе погрешность статической настройки, как правило, составляет наибольшее значение и ее необходимо автоматически компенсировать. Автоматическую коррекцию статической настройки можно осуществлять также непосредственно в процессе обработки партии деталей после одного или нескольких циклов. Это повышает точность обработки за счет уменьшения влияния систематически действующих факторов.

Рассматриваемый способ коррекции статической настройки основан на измерении точности положения инструмента и спутника с деталью относительно начала отсчета.

Для получения информации о положении режущего инструмента и его размерном износе применяют контрольно-измерительные системы с использованием индуктивных, электроконтактных, пневматических и фотоэлектрических датчиков-преобразователей. Более универ-

сальными являются системы, работающие по принципу касания режущей кромки измерительного наконечника, по которым фиксируют отклонения различного инструмента (рис. 6.16).

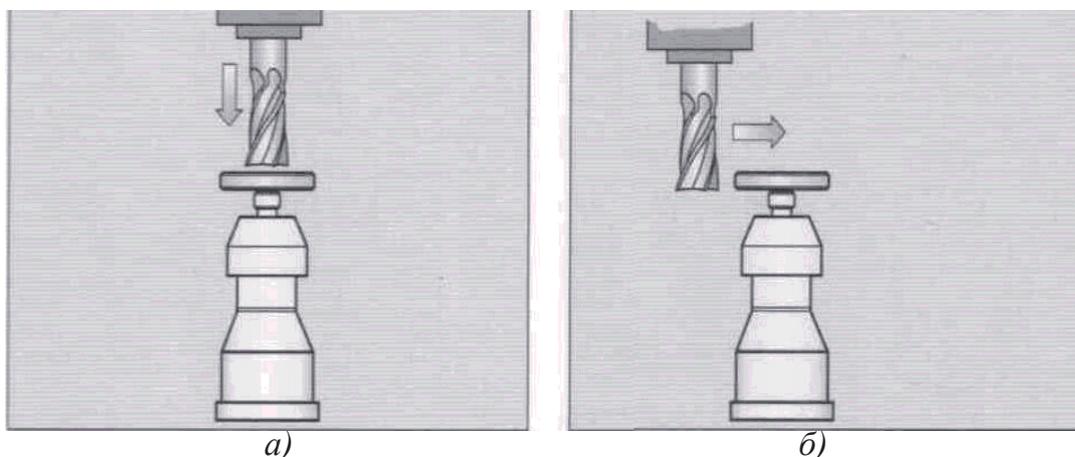


Рис. 6.16. Схема измерения положения концевой фрезы в исходном положении: *а* – измерение точности положения режущих кромок в осевом направлении; *б* – измерение точности положения режущих кромок в радиальном направлении

Для контроля точности положения исполнительных поверхностей инструмента в трех координатных направлениях применяют трехкоординатные измерительные головки стационарного исполнения. Использование измерительной головки позволяет определить целостность инструмента и отклонения его вершины в трех координатных направлениях, которые обусловлены совокупным влиянием погрешности установки инструмента в шпиндель, размерным износом его режущих кромок и температурными деформациями звеньев технологической системы.

Последовательность относительных перемещений рабочих органов станка при выполнении автоматического контроля задается в виде определенного цикла в управляющей программе ЧПУ станка. На рис. 6.16, *а* показана схема измерения отклонений режущих кромок концевой фрезы в осевом направлении. Для измерения отклонений режущих кромок в радиальном направлении фреза подводится к измерительной головке по горизонтали (рис. 6.16, *б*). При наличии на станке системы точной остановки шпинделя в требуемом угловом положении представляется возможным оценить отклонения положения режущих кромок в осевом и радиальном направлениях на каждом из зубьев фрезы.

Измерительная головка в стационарном исполнении обычно имеет два конструктивных исполнения – с электроконтактным или индуктивным преобразователями. В первом случае измерительная головка фикс-

сирует момент контакта с режущей кромкой инструмента, а величина отклонения определяется с помощью измерительной системы ЧПУ станка. Во втором случае величина отклонения определяется индуктивным преобразователем, расположенным в измерительной головке. При использовании головки с индуктивным датчиком цикл измерений упрощается и обеспечивается более высокая точность измерения отклонений.

Наконечник измерительной головки может быть выполнен в форме куба, шарика или в виде поворотной плоской шайбы, изготовление которой из материала высокой твердости позволяет осуществлять контроль при вращающемся инструменте.

Введение выявленных отклонений  $\Delta_x$ ,  $\Delta_y$ ,  $\Delta_z$  как корректирующих поправок  $K_x = \Delta_x$ ,  $K_y = \Delta_y$ ,  $K_z = \Delta_z$  в соответствующие управляемые координаты позволяет повысить точность обработки на технологических переходах, выполняемых данным инструментом. Так, например, коррекция отклонений размеров концевой фрезы обеспечивает повышение точности фрезерования как контурных, так и прямолинейных поверхностей.

Внесение изменений в управляющую программу станка с ЧПУ для компенсации отклонений относительного положения режущего инструмента и обрабатываемой заготовки в исходном положении осуществляется специальной процедурой коррекции, выполняемой с помощью ЭВМ. Путем анализа текста заданной в системе ЧПУ технологической программы выявляют кадры, в которых используется на соответствующих технологических переходах рассматриваемый инструмент. А затем все значения управляемых координат, определяющих относительные перемещения данного инструмента, корректируют в соответствии с рассчитанными значениями поправок  $K_x$ ,  $K_y$ ,  $K_z$ .

В процессе работы станка всю необходимую исходную информацию систематически получают с датчиков, фиксирующих отклонения положения режущего инструмента и пространственные отклонения заготовки и спутника в исходном положении.

Если определенные отклонения исполнительных поверхностей станка, возникающие по ходу обработки, порождаются действием систематических факторов и определяются как функция времени  $K(\tau)$ , то формирование значений корректирующих поправок также можно выразить как функции времени:  $K_{x\Sigma} = K_x + K_x(\tau)$ ,  $K_{y\Sigma} = K_y + K_y(\tau)$ ,  $K_{z\Sigma} = K_z + K_z(\tau)$ .

Это достигается путем введения в микропроцессор коррекции размерных связей системы дополнительного программного модуля.

#### **6.4. Управление точностью и производительностью обработки на станках в процессе резания**

На этапе динамической настройки, когда происходит снятие материала резанием, в технологической системе имеет место действие силовых, тепловых и других переменных факторов, определяемых динамикой процесса резания. Несмотря на то, что в основе действия этих факторов лежат различные физические явления, влияние их на точность обработки проявляется на замыкающем звене через размерные связи технологической системы, управление которыми в процессе резания рассмотрено ниже [1].

##### ***Управление точностью и производительностью обработки путем регулирования продольной подачи***

Сущность рассматриваемого способа адаптивного управления заключается в том, что в процессе резания обеспечивается стабилизация или изменение размера динамической настройки по определенному закону путем регулирования продольной подачи. Размер динамической настройки, значение которого определяется в основном величиной упругого перемещения на замыкающем звене  $A_d \equiv Y_\Delta$ , зависит от величины силы резания и жесткости технологической системы. Поэтому управлять размером  $A_d$  можно воздействуя на вектор силы резания или на жесткость системы – станок, приспособление, инструмент, деталь. Сила резания, в свою очередь, является функцией нескольких аргументов:

$$P = f(C_p, t, HB, v, s, k \dots),$$

где  $C_p$  – коэффициент, характеризующий условия обработки;  $t$  – глубина резания;  $s$  – продольная подача;  $v$  – скорость резания;  $HB$  – твердость обрабатываемого материала;  $k$  – коэффициент, характеризующий геометрию режущего инструмента. Таким образом, воздействовать на вектор силы резания можно, изменяя в процессе обработки ряд параметров: продольную подачу, скорость резания  $v$ , геометрию резания  $k$ , условия обработки  $C_p$ .

Анализ показывает, что рассматриваемые параметры по-разному влияют на составляющие вектора силы резания. Поэтому выбор каждого из них в качестве параметра регулирования не является однозначным. Наибольшее влияние на составляющие силы резания в большин-

стве случаев оказывает продольная подача  $s$ . Изменяя величину подачи, можно так воздействовать на силу резания, что отклонение размера динамической настройки от заданного значения может быть достаточно малым (рис. 6.17). Регулирование продольной подачи позволяет получить наиболее тонкий и чувствительный способ управления непосредственно упругим перемещением в технологической системе. Это определяет его основное преимущество.

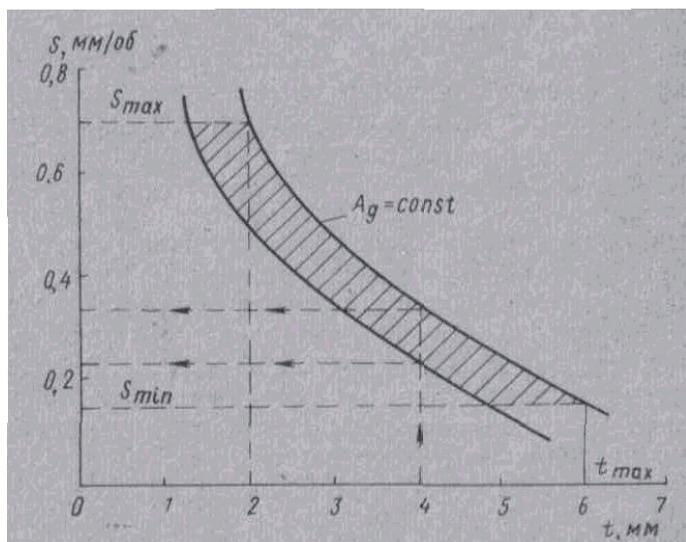


Рис. 6.17. График изменения продольной подачи в зависимости от глубины резания при стабилизации размера динамической настройки на токарном гидрокопировальном полуавтомате

живается на заданном постоянном значении:

$$A_d = \text{const.}$$

С увеличением глубины резания продольная подача уменьшается до наименьшего значения  $s_{\min}$ , а с уменьшением глубины – увеличивается. Наибольшее предельное значение подачи  $s_{\max}$  обычно устанавливают исходя из необходимости получения требуемой шероховатости поверхности детали и с учетом геометрии режущего инструмента. Для исключения возможности удара и недопустимой перегрузки при выборе наибольшего значения подачи необходимо учитывать быстродействие системы. Наименьшее предельное значение  $s_{\min}$  устанавливают с учетом возможного колебания глубины резания. В ряде случаев его устанавливают из условия исключения возможных вибраций при больших глубинах резания или из требования обеспечения необходимого стружкодробления.

Таким образом, при данном способе управления в размер динамической настройки в процессе обработки систематически вносятся поправка  $\Delta'_d$ , компенсирующая отклонения размера  $\Delta_d$ , обусловленные колебанием припуска, твердостью, затуплением режущего инструмента и другими факторами:

$$A_\Delta = A_y + A_c + A_d + (\Delta_d - \Delta'_d).$$

В результате размер динамической настройки в процессе резания поддер-

В процессе регулирования при поддержании требуемой точности размера динамической настройки одной и той же глубине резания  $t$  может соответствовать разная по величине продольная подача. Это объясняется различной степенью затупления режущего инструмента и изменением твердости материала обрабатываемых заготовок. Поэтому на графике изображены две идентичные кривые, ограничивающие определенную область возможных значений продольной подачи при соответствующих значениях глубины резания. Верхнее значение подачи  $s$  имеет место при точении острым инструментом заготовок с меньшей предельной твердостью, нижнее значение – при точении затупленным инструментом заготовок с большей предельной твердостью.

Применение рассматриваемого способа адаптивного управления обеспечивает повышение производительности путем сокращения основного технологического времени за счет обработки детали с более высокой подачей, автоматически изменяющейся в соответствии с фактическими условиями резания. При обычной обработке величина продольной подачи, устанавливаемая исходя из наибольшего припуска и твердости заготовки, остается постоянной, хотя на участках с меньшим припуском и твердостью ее можно увеличить. В случае использования САУ величина продольной подачи автоматически возрастает на участках с меньшим припуском и твердостью или уменьшается при возникновении перегрузок, обусловленных увеличением глубины резания, твердостью материала заготовки и затуплением режущего инструмента. В результате обеспечивается достижение требуемой более высокой точности обработки с большей производительностью.

Структурная схема системы, обеспечивающая стабилизацию размера динамической настройки на токарном гидрокопировальном станке мод. 1Б732, показана на рис. 6.18.

Для тяжелого токарно-копировального станка модели 1Б732 главная составляющая силы резания  $P_z$  наиболее точно определяет изменение величины упругого перемещения на замыкающем звене и может быть принята в автоматической системе управления в качестве регулируемой величины. Составляющая  $P_z$  определяется одновременным измерением мощности  $N$ , потребляемой двигателем главного движения, и расстоянием от вершины режущей кромки инструмента до линии центров. Измерение координаты положения вершины инструмента относительно линии центров обусловлено необходимостью учета измене-

ний скорости резания, получаемых при точении ступенчатого вала с постоянной частотой вращения шпинделя. В случае выполнения обработки

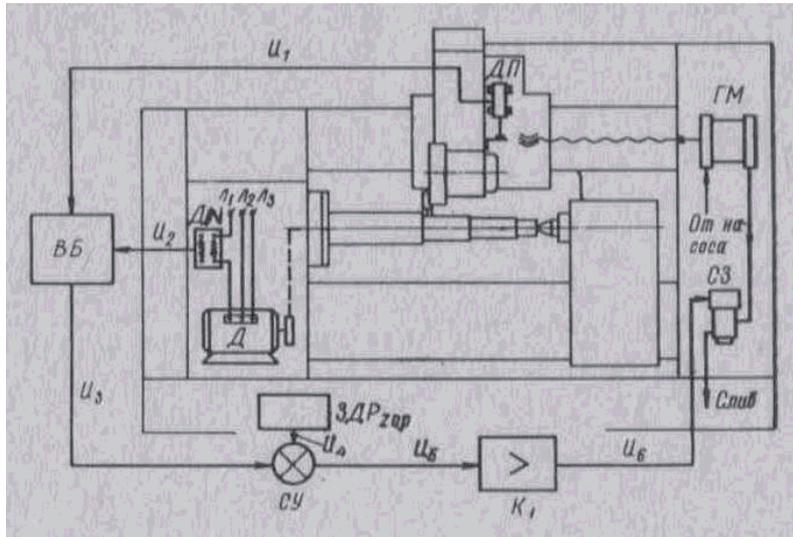


Рис. 6.18. Структурная схема и основные узлы системы управления размером динамической настройки на станке мод. 1Б732

с постоянной скоростью резания, которая достигается бесступенчатым регулированием частоты вращения шпинделя, необходимость измерения расстояния от вершины резца до линии центров отпадает.

Параметром регулирования (управляющим воздействием) является продольная подача суппорта. Мощность, потребляемая двигателем главного движения, измеряется датчиком ДН, в качестве которого используется трансформатор тока, встраиваемый в одну из фаз двигателя Д. Расстояние от вершины режущей кромки инструмента до линии центров определяется с помощью специального датчика ДП, измеряющего перемещение поперечной каретки суппорта в радиальном направлении.

Электрические сигналы с обоих датчиков  $u_1$  и  $u_2$  поступают в вычислительный блок ВБ, выдающий сигнал  $u_3$ , пропорциональный главной составляющей  $P_z$  вектора силы резания.

С вычислительного блока сигнал подается на сравнивающее устройство СУ, куда поступает также сигнал  $u_4$  с задатчика ЗДР<sub>зпр</sub> предельного значения составляющей  $P_z$ . Получаемый на схеме сравнения сигнал рассогласования  $u_5$  усиливается с помощью электронного усилителя  $K_1$  до значения  $u_6$  и подается на исполнительный механизм. В качестве последнего используется следящий золотник СЗ с электроуправлением, обеспечивающий бесступенчатое регулирование продольной подачи суппорта в соответствии с поступающим электрическим сигналом.

Применение САУ позволяет получить требуемую точность детали с меньшим числом проходов или с меньшим числом операций. В качестве примера на рис. 6.19 представлена схема обработки вала из прут-

ки с постоянной скоростью резания, которая достигается бесступенчатым регулированием частоты вращения шпинделя, необходимость измерения расстояния от вершины резца до линии центров отпадает.

Параметром регулирования (управляющим воздействием) является продольная подача суппорта. Мощность, потребляемая двигателем главного движения, измеряется датчиком ДН, в качестве которого используется трансформатор тока, встраиваемый в одну из фаз двигателя Д. Расстояние от вершины режущей кромки инструмента до линии центров определяется с помощью специального датчика ДП, измеряющего перемещение поперечной каретки суппорта в радиальном направлении.

ка, сталь 45,  $L = 925$  мм,  $\Phi 95$ , на токарном копировальном полуавтомате модели 1Б732. Без адаптивной системы вал обрабатывают за четыре прохода (рис. 6.19, а). I и II-ой проходы осуществлялись по упорам  $t_1 = 7,5$  мм,  $t_2 = 10$  мм, III проход – по черновому копиру  $t_3 = 2,5 \dots 10$  мм, а четвертый – по чистовому копиру  $t_4 = 2,5$  мм. При этом время, затрачиваемое на выполнение каждого прохода, составляло  $T_1 = 60$  с,  $T_2 = 12$  с,  $T_3 = 160$  с,  $T_4 = 150$  с, а суммарное машинное время  $T_{\Sigma} = 382$  с.

При обработке детали с применением САУ (рис. 6.19, б) основное время уменьшается до 304 с, при этом время, затрачиваемое на каждый проход, составило соответственно:  $T'_1 = 55$ ,  $T'_2 = 10$ ,  $T'_3 = 115$  с,  $T'_4 = 124$  с.

По новому циклу обработка выполняется за три прохода. Первый проход по упорам  $t_1 = 8,5$  мм, второй  $t_2 = 2,5 - 6,5$  мм и третий  $t_3 = 2,5$  мм. В результате время цикла обработки детали уменьшилось до 270 с.

Таким образом, применение САУ при обработке рассматриваемого вала позволило уменьшить машинное время на 30 %.

#### ***Управление точностью в процессе резания путем регулирования размера статической настройки***

Сущность этого способа заключается в том, что отклонения размера динамической настройки  $\Delta_d$ , возникающие на замыкающем звене, компенсируются путем регулирования в процессе резания размера статической настройки  $A_c$ . Перед обработкой размер статической настройки устанавливают равным рабочему настроечному размеру  $A_c = A_p$ . В процессе об-

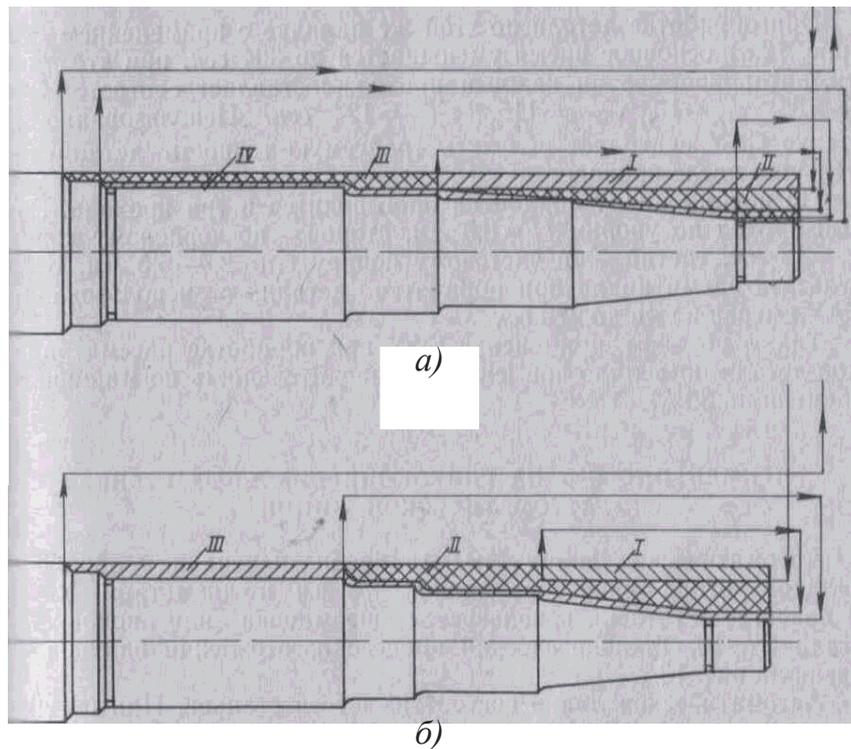


Рис. 6.19. Схема обработки вала на станке мод. 1Б732: а – с системой адаптивного управления; б – без системы адаптивного управления

работки при возникновении отклонений  $\Delta_d$  размер статической настройки изменяется на ту же величину в противоположном направлении, то есть  $\Delta_c = \Delta_d$ . При этом на детали получается размер, равный заданному рабочему настроечному размеру:  $A_\Delta = A_y + (A_c \pm \Delta_c) + (A_d \pm \Delta_d) = A_p$ .

Изменение размера статической настройки приводит к изменению глубины резания, а следовательно, и силы резания, однако эти изменения незначительны и являются величиной второго порядка малости.

Способ управления точностью детали путем регулирования размера статической настройки имеет следующие преимущества:

- точность обработки не ниже, чем при первом способе, а отсутствие необходимости регулирования продольной подачи позволяет получать детали с одинаковой шероховатостью обработанной поверхности;
- в процессе обработки можно поддерживать заданную при настройке точность относительного положения исполнительных поверхностей, благодаря этому получаемые размеры близки к требуемым;
- существенно упрощается размерная настройка станков на точность, что особенно важно для автоматического достижения точности на станках с программным управлением.

Реализация рассматриваемого способа управления требует наличия

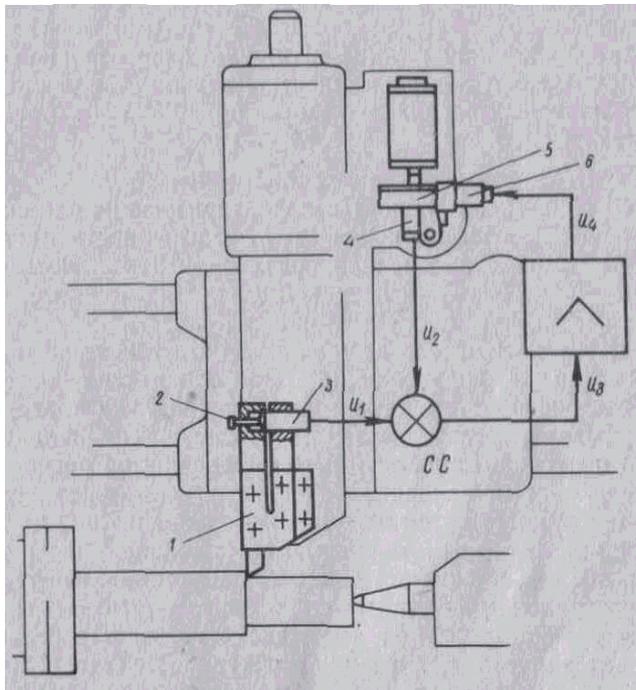


Рис. 6.20. Структурная схема и основные узлы системы автоматического управления размером статической настройки

на станке привода, обеспечивающего создание малых реверсивных перемещений инструмента относительно детали.

На рис. 6.20 показана структурная схема и основные узлы системы автоматического управления (САУ) размером  $A_c$ , созданной для гидроконтрольных станков модели 1722. С помощью динамометрического узла, состоящего из упругой резцедержавки 1 и индуктивного датчика 3, упирающегося в регулировочный винт 2, непрерывно измеряют величину упругого перемеще-

ния резца относительно оси детали. Электрический сигнал  $u_1$  от индуктивного датчика подается на схему сравнения СС. На эту схему поступает также сигнал  $u_2$  от датчика обратной связи 4, измеряющего приращение размера статической застройки, то есть поднастроечное перемещение суппорта.

В результате автоматического сравнения сигналов  $u_1$  и  $u_2$  на усилитель поступает сигнал рассогласования  $u_3$ . Последний усиливается до  $u_4$  и подается на исполнительный механизм, состоящий из электродвигателя 6 и механизма малых перемещений 5. Исполнительный механизм осуществляет изменение размера статической настройки путем перемещения суппорта в соответствии с величиной подаваемого сигнала управления.

Для создания малых реверсивных перемещений инструмента относительно детали был разработан механизм малых перемещений, который встраивается в рычаги упора щупа (рис. 6.21). Рычаг упора щупа 1 является промежуточным звеном между копиром, определяющим геометрию получаемой детали, и щупом следящего гидрозолотника. Это обеспечивает

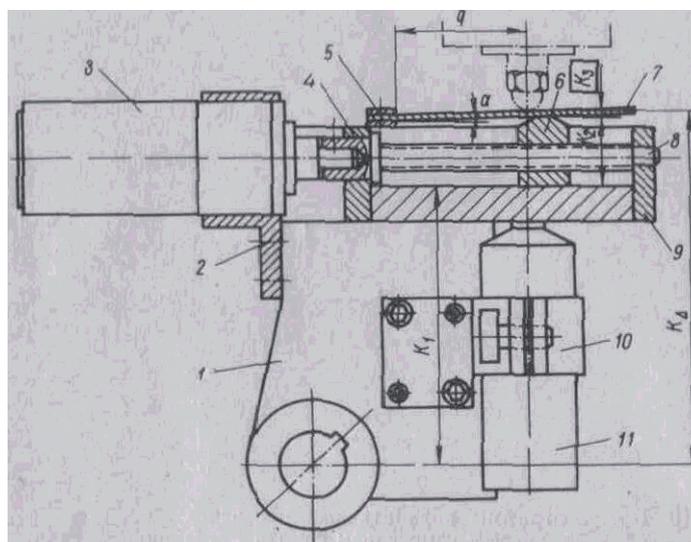


Рис. 6.21. Схема механизма малых реверсивных перемещений

высокую точность передачи создаваемых малых перемещений на щуп и позволяет использовать все преимущества следящего гидропривода станка при обработке суппортом поднастроечных радиальных перемещений. Таким образом, в качестве компенсирующего звена технологической размерной цепи станка модели 1722 был использован размер, определяющий толщину слоя масла в гидроцилиндре поперечного перемещения.

Без изменения общей конструкции рычага 1 (см. рис. 6.21) в верхней части его корпуса был прорезан прямоугольный паз, в котором перемещается сухарь 6. Движение сухаря происходит в результате вращения винта 8, установленного на двух опорах скольжения 4 и 9. Винт

приводится во вращение через муфту электродвигателем постоянного тока 3, который укреплен на рычаге с помощью разжимной оправки 2. На сухарь опирается стальная пластина 7, консольно закрепленная двумя планками 5. Пластина 7 наклонена под небольшим углом  $\alpha = 3 \dots 5^\circ$  относительно нижней направляющей плоскости паза. При вращении винта сухарь поднимает или опускает стальную пластину, которая, в свою очередь, смещает щуп следящего золотника, создавая малые перемещения суппорта.

На рычаге 1 при помощи разжимной оправки 10 закреплен также индуктивный датчик обратной связи 11. Установленный соосно со следящим золотником датчик 11 измеряет величину поднастроечного перемещения суппорта по смещению пластины в точке ее контакта со щупом. На рис. 6.21 приведена также схема размерной цепи  $K_\Delta$ , показывающая образование на рычаге дополнительного размера  $K_3$ , определяющего малые поднастроечные перемещения суппорта:

$$K_\Delta = K_1 + K_2 + K_3.$$

В процессе точения поперечная каретка с расположенным на ней суппортом находится в определенном положении, которое определяется толщиной масла в полостях поперечного гидроцилиндра. При изменении звена  $K_3$  происходит подача определенного объема масла в верхнюю или нижнюю полости гидроцилиндра под давлением 3 МПа, что создает движущую силу более 36000 Н, которая легко смещает суппорт на требуемое малое расстояние.

Практика работы на токарном гидрокопировальном станке 1722, оснащенном системой автоматического регулирования, показала, что использование системы позволяет в 2 – 3 раза повысить точность диаметральных размеров и увеличить производительность обработки вследствие существенного упрощения настройки системы СПИД. Повышение точности происходит в результате сокращения мгновенного поля рассеяния  $\omega_r$ , порождаемого такими случайными факторами, как колебание припуска, твердость заготовки и затупление режущего инструмента.

Если при обычной обработке деталей из стали 45 с колебанием припуска от  $t_1 = 2$  мм до  $t_2 = 5$  мм величина поля рассеяния диаметральных размеров составляет 0,062 мм, то при обработке с использованием САУ поле рассеяния сокращается до  $\omega_r = 0,02$  мм. На рис. 6.22 представлены профилограммы поверхностей, полученных в ре-

зультате обточки с  $s = 0,6$  мм/об и  $v = 80$  м/мин двух одинаковых заготовок со ступенчатым возрастанием припуска от  $t_1 = 2$  мм до  $t_2 = 6$  мм. Перепад диаметров на первой детали, обточенной без регулирования (рис. 6.22, а), составил 0,05 мм, а на второй (рис. 6.22, б), обточенной с использованием САУ, – 0,01 мм. Если при обычной обработке больших партий точность диаметральных размеров составляет 0,2 мм, то при использовании САУ она повышается до 0,07 – 0,06 мм. Эффективность применения САУ особенно увеличивается при обработке заготовок с большим колебанием припуска и твердости.

Способ управления размером статической настройки позволяет повысить как точность диаметральных размеров, так и точность формы детали в продольном и поперечном сечениях. С этой целью выполняют программное управление размером статической настройки,

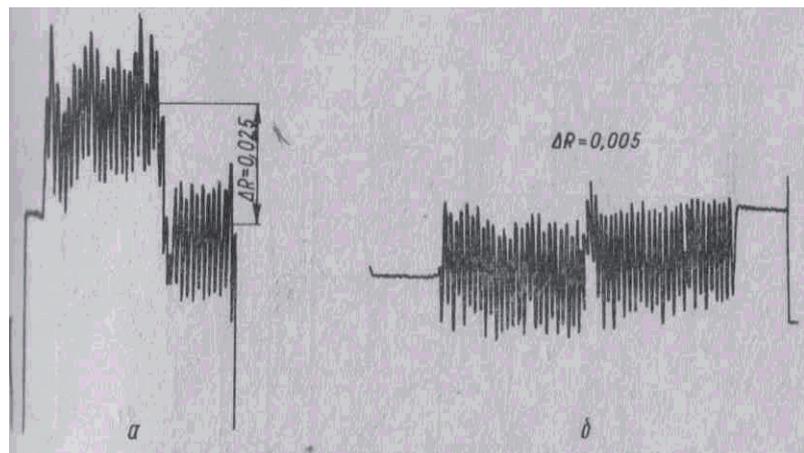


Рис. 6.22. Профилограмма поверхности детали, полученной точением ступенчатой заготовки: а – обработка с регулированием размера  $A_c$ ; б – обработка без регулирования

при котором изменение размера  $A_c$  осуществляют по определенному закону как функцию задаваемого параметра, например координаты перемещения резца или времени обработки.

#### ***Комплексное управление статической и динамической настройками технологической системы***

Одним из эффективных способов адаптивного управления на станках является способ комплексного управления статической и динамической настройками, обеспечивающий автоматическое управление как точностью, так и производительностью механической обработки. Реализация этого способа основана на применении контура управления размером  $A_c$  и контура управления размером  $A_d$ .

При конкретных условиях резания, определенной глубине  $t$ , твердости  $HВ$  и скорости резания  $v$  производительность механической обработки пропорциональна величине продольной подачи  $s$ . Поэтому для

сокращения основного времени обработку необходимо производить с максимально возможной подачей, соответствующей наиболее полному использованию режущей способности инструмента, кинематическому диапазону станка и динамическим возможностям системы при непрерывном условии получения требуемой точности обработки.

Обычно при черновой или получистовой обработке наибольшая величина подачи  $s$  ограничивается предельным значением силы резания, при которой исключается возможность поломки и недопустимой деформации звеньев системы СПИД. На некоторых станках наибольшее предельное значение продольной подачи в условиях силового резания ограничивается мощностью привода.

О величине действующей нагрузки достаточно точно можно судить по величине упругого перемещения на замыкающем звене, являющейся функцией составляющих силы резания. Предельному значению нагрузки, при которой возможна поломка наиболее слабого звена, соответствует определенное значение упругого перемещения на замыкающем звене  $A_{д.пр} \equiv Y_{\Delta пр}$ . Измеряя в процессе резания размер динамической настройки, мы имеем возможность непрерывно контролировать степень нагрузки в системе, а следовательно, и вероятность поломки слабого звена.

При обработке деталей нормальной твердости с незначительной глубиной резания, когда абсолютное значение вектора силы резания сравнительно невелико, наибольшее предельное значение подачи ограничивается требованием получения необходимой шероховатости поверхности. Это обстоятельство приобретает особенно важное значение в условиях чистовой обработки, когда глубина резания сравнительно мала, а к шероховатости поверхности предъявляются повышенные требования.

Таким образом, в качестве критериев оценки оптимального значения продольной подачи  $s$  можно принять:

- наибольшее предельное значение  $A_{д.пр} \equiv Y_{\Delta пр}$ , при котором исключается возможность поломки слабого звена системы;
- наибольшее значение продольной подачи  $s_{\nabla}$ , при котором обеспечивается получение необходимой шероховатости поверхности.

Регулирование статической настройки обеспечивает получение требуемой точности размеров детали  $A_{\Delta}$  при обработке с различной продольной подачей  $s$ . В зависимости от значения подачи  $s_1, s_2 \dots s_n$  из-

меняется и величина упругого перемещения на замыкающем звене  $A_{д1}$ ,  $A_{д2}$ , ...  $A_{дn}$ , однако сумма размеров статической и динамической настроек остается постоянной:

$$A_{\Delta} = A_{c1} + A_{д1} = A_{c2} + A_{д2} = \dots = A_{cn} + A_{дn} = A_p = \text{const.}$$

Среди всей парной совокупности значений  $A_c$  и  $A_d$ , обеспечивающей получение заданной точности размера детали, имеются оптимальные значения  $A_{c,оп}$ ,  $A_{д,оп}$ , которые соответствуют обработке с оптимальной величиной подачи  $s_{оп}$ , то есть с максимальной для данных условий производительностью. Задача автоматического отыскания и поддержания наивыгоднейшего режима работы, то есть оптимальных значений  $s_{оп}$ ,  $A_{c,оп}$ ,  $A_{д,оп}$ , решается путем комплексного регулирования статической и динамической настроек. Если следящее регулирование статической настройки обеспечивает получение заданной точности детали, то регулирование динамической настройки путем изменения продольной подачи для поддержания одного из двух критериев оптимальности обеспечивает возможность получения максимальной производительности.

При комплексном регулировании размеры статической настройки задают равными рабочим настроечным размерам  $A_c = A_p$ . Подвод инструмента к детали и врезание осуществляется с наибольшим значением продольной подачи  $s_{\nabla}$ , обеспечивающим получение требуемой шероховатости поверхности. В процессе резания, начиная с момента врезания, измеряют  $A_d$  и регулируют статическую настройку на эту же величину  $\Delta_c = A_d$  в противоположном направлении. Если в процессе резания величина упругого перемещения не превышает предельного допустимого значения  $A_d \leq A_{д,пр}$ , то обработка происходит с наибольшим допустимым по шероховатости значением подачи  $s = s_{\nabla}$ . Изменения величины упругого перемещения, порождаемые колебанием припуска, твердости или затуплением режущего инструмента, компенсируются при этом путем регулирования размера статической настройки. Если на какой-нибудь заготовке или участке поверхности величина упругого перемещения настолько возрастает, что может превысить допустимое значение  $A_{д,пр}$ , то производится управление размером динамической настройки путем регулирования продольной подачи в сторону ее уменьшения до нового оптимального значения, при котором  $A_d = A_{д,пр} = \text{const}$ . Аналогичное регулирование подачи в сторону уменьшения до  $s < s_{\nabla}$  может происходить также в процессе врезания, если возникающая величина упругого перемещения может превысить предельное значение  $A_d > A_{д,пр}$ . При работе

станка в этом режиме размер статической настройки остается неизменным, так как величина упругого перемещения стабилизируется за счет регулирования подачи  $A_d = A_{д.пр} = \text{const}$ . Однако при переходе на обработку новой ступени или участка заготовки, где величина  $A_d < A_{д.пр}$ , производится регулирование статической настройки и регулирование подачи в сторону ее увеличения до значения  $s = s_{\nabla}$ .

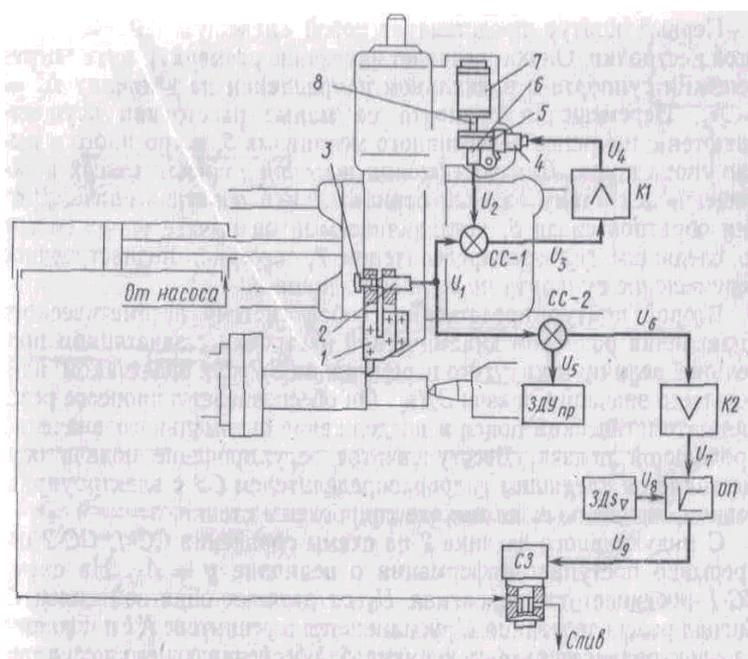


Рис. 6.23. Структурная схема и основные узлы системы комплексного управления статической и динамической настройками

регулируемый винт 3, непрерывно измеряется размер динамической настройки.

Первый контур представляет собой следящую САУ статической настройки. Он обеспечивает изменение размера  $A_c$  путем перемещения суппорта в радиальном направлении на величину  $\Delta_c = A_d$ . Перемещения суппорта на малые расстояния осуществляются с помощью механизма 5, встроенного в рычаг упора щупа. Для достижения высокой точности малых перемещений в систему введена отрицательная обратная связь. Датчик обратной связи 6, установленный на рычаге упора соосно со следящим гидрозолотником 7, измеряет поднастроечные перемещения суппорта по смещению щупа 8.

Второй контур представляет собой систему автоматического управления размером динамической настройки с задатчиком предельной величины упругого перемещения  $ЗДУ_{пр}$  и задатчиком наибольшего значе-

На рис. 6.23 представлена структурная схема и основные узлы автоматической системы, обеспечивающей комплексное управление статической и динамической настройками. Система состоит из двух контуров с общим динамометрическим узлом, встроенным в резцедержатель. С помощью динамометрического узла, состоящего из упругого резцедержателя 1 и индуктивного датчика 2, упирающегося в ре-

ния продольной подачи  $\Delta s_{\nabla}$ . Он обеспечивает в процессе резания автоматический поиск и поддержание оптимального значения продольной подачи. Бесступенчатое регулирование подачи осуществляется следящим гидрораспределителем (СЗ) с электроуправлением, встроенным на выходе гидросхемы станка. С индуктивного датчика 2 на схемы сравнения СС-1, СС-2 непрерывно поступает информация о величине  $y = A_d$ . На схему СС-1 поступает также сигнал  $U_2$  от датчика обратной связи 6. Сигнал рассогласования  $U_3$  усиливается в усилителе К1 и подается на электродвигатель 4 механизма 5, обеспечивающего регулирование размера статической настройки. На схему СС-2 поступает также от задатчика ЗДУ<sub>пр</sub> сигнал  $U_5$ , соответствующий величине  $Y_{пр}$ . Сигнал рассогласования  $U_6$  усиливается усилителем К2 и подается через ограничитель подачи (ОП) на электромеханический преобразователь следящего золотника (СЗ). Непрерывное формирование сигнала  $U_{\rho}$ , соответствующего критерию оптимального значения подачи, происходит в результате наличия двух задатчиков ЗДУ<sub>пр</sub>,  $\Delta s_{\nabla}$  и ограничителя ОП. Таким образом, в процессе резания система следит за величиной упругого перемещения и вносит соответствующие поправки в размер статической настройки, а путем регулирования продольной подачи производит стабилизацию размера динамической настройки, когда он достигает заданного предельного значения.

Сущность процесса управления точностью и производительностью обработки путем комплексного управления статической и динамической настройками наглядно показывает осциллограмма, приведенная на рис. 6.24. Нижние кривые 2 и 3 характеризуют соответственно изменение

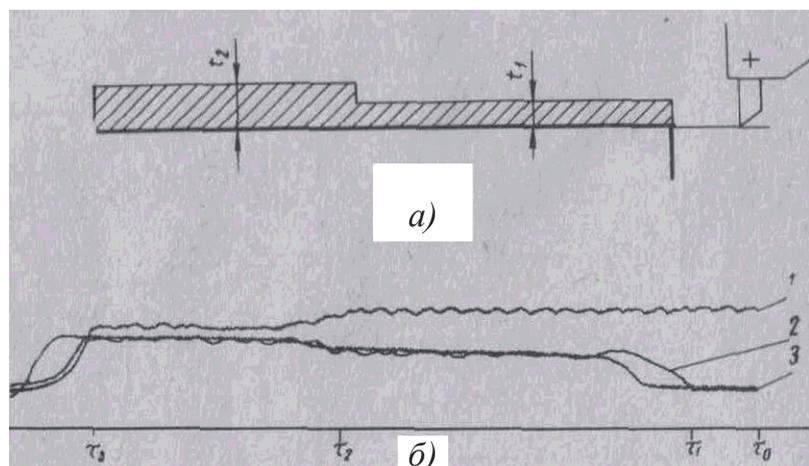


Рис. 6.24. Осциллограмма процесса комплексного управления статической и динамической настройками: а – схема обработки; б – осциллограмма процесса регулирования

упругого перемещения  $A_d$  и изменение размера статической настройки  $\Delta_c$ . Верхняя кривая 1 характеризует изменение величины продольной по-

дачи  $s$ . При подводе резца к детали (интервал  $\tau_0 \dots \tau_1$ ) величина  $A_d = 0$ . Размер статической настройки  $A_c = A_p$  не изменяется, а величина продольной подачи поддерживается равной наибольшему значению:  $s = s_v$ . В момент  $\tau_1$  происходит врезание и величина  $A_d$  резко возрастает. В соответствии с изменением  $A_d$  происходит регулирование размера статической настройки  $\Delta_c$  на величину упругого перемещения, направленную в противоположную сторону:  $\Delta_c = A_d$ . На осциллограмме для наглядности изменения  $A_d$  и  $A_c$  записывались в одном направлении. При этом на детали получается радиальный размер, равный заданному настроечному размеру:  $A_d = A_p$ . При обтачивании участка детали с  $t = 2,5$  мм (интервал  $\tau_1 \dots \tau_2$ ) величина  $A_d < A_{д.пр}$ , поэтому продольная подача поддерживается на наибольшем значении, которое допускается по шероховатости поверхности:

$$s = s_v = 0,6 \text{ мм/об.}$$

В момент  $\tau_2$  вследствие ступенчатого возрастания глубины резания от  $t_1 = 2,5$  мм до  $t_2 = 6$  мм происходит добавочное увеличение величины  $A_d$ , в соответствии с этим происходит дополнительное регулирование размера  $A_c$ . Однако величина  $A_d$  может превысить допустимое значение  $A_{д.пр}$ , поэтому происходит регулирование продольной подачи в сторону ее уменьшения до значения  $s = 0,52$  мм/об, при котором  $A_d = A_{д.пр} = \text{const}$ . Таким образом, в процессе точения участка при  $t = 6$  мм (интервал  $\tau_2 \dots \tau_3$ ) происходит управление размером динамической настройки путем регулирования продольной подачи.

Итак, способ комплексного управления статической и динамической настройками обладает всеми преимуществами рассмотренных выше двух способов управления. Использование этого способа представляется наиболее эффективным на станках с программным управлением, применяемых в мелкосерийном и серийном производствах, что обеспечивает возможность дальнейшего повышения их технологической гибкости.

### ***Адаптивное управление процессом глубокого сверления отверстий***

Глубокое сверление отверстий спиральными сверлами малого диаметра представляет собой малопроизводительную трудоемкую операцию, которая в единичном и мелкосерийном производстве выполняется на обычных сверлильных станках рабочим, а в условиях крупносерийного производства – на сверлильных полуавтоматах и автоматах агрегатного типа.

При сверлении отверстий на глубину более  $5D$ , где  $D$  – диаметр сверла, условия резания значительно ухудшаются. По мере заглубления сверла увеличивается длина контакта инструмента и детали, в результате чего происходит возрастание момента трения сверла о стенки отверстия. Момент трения особенно сильно возрастает при деформации сверла из-за увода или искривления его оси. Кроме того, по мере заглубления сверла усиливается трение стружки о стенки отверстия и канавки сверла, что ухудшает условия отвода стружки и вызывает дополнительное увеличение крутящего момента на инструменте.

При этом имеет место плохое охлаждение инструмента из-за недостаточного поступления СОЖ в зону резания. Этот фактор имеет особое значение для сверл малого диаметра  $D < 4$  мм, у которых отвод тепла в тело инструмента очень мал. В результате отсутствия должного теплоотвода температура в зоне резания резко возрастает, что вызывает интенсивный износ инструмента и увеличение крутящего момента на сверле.

Все это на определенном заглублении приводит к «пакетированию» (уплотнению) стружки в канавках сверла, а в ряде случаев к свариванию стружки с обрабатываемой заготовкой. Крутящий момент при этом резко возрастает, превышая критическое значение, что приводит к поломке сверла. Поломка сверла на значительной глубине, в свою очередь, приводит к получению бракованной детали, что влечет за собой увеличение производственных затрат.

Для исключения этого на обычных станках сверление выполняют на заниженных режимах резания с постоянной осевой подачей при периодическом выводе сверла из отверстия для удаления стружки и охлаждения инструмента. Значение осевой подачи рекомендуется назначать не более  $0,01 \cdot D$  мм/об, где  $D$  – диаметр сверла в мм. Величина заглубления по всей длине отверстия также принимается постоянной в пределах  $(0,7 \dots 1)D$  мм. При величине заглубления от 3 до 10 диаметров сверла рекомендуется уменьшать скорость резания в два раза.

Процесс глубокого сверления на универсальном станке контролирует сам рабочий, который по характеру стружки, температуре нагрева, «скрипу» и другим факторам оценивает состояние инструмента и характер процесса резания. В случае необходимости инструмент выводится из отверстия.

Практика показывает, что при обычной обработке число выводов,

как правило, превышает отношение глубины сверления  $L$  к его диаметру  $D$ . Так, например, при сверлении отверстия диаметром  $D = 2$  мм на глубину  $L = 67$  мм число выводов равно 45, и, несмотря на это, брак, получаемый в основном из-за поломки сверл, составляет 4,5 %.

На обычных станках полуавтоматах, работающих по предусмотренному жесткому циклу, вывод инструмента из отверстия происходит без учета и объективной оценки действующей на сверло нагрузки. Поэтому возникающие перегрузки вызывают интенсивный износ режущей части сверла, продольный изгиб, заклинивание, что приводит к уходу сверла и его поломке.

На станках для глубокого сверления, оснащенных системой адаптивного управления, цикл сверления осуществляется при поддержании заданной постоянной величины крутящего момента  $M_{кр} = \text{const}$  в процессе каждого заглубления. Величина крутящего момента  $M_{кр}$  и осевой силы  $P_o$  определяется формулами

$$M_{кр} = C_M D^{z_M} s^{y_M} K_M; \quad P_o = C_P D^{z_P} s^{y_P} K_P$$

где  $C_M, C_P$  – коэффициенты, характеризующие физико-механические свойства материала обрабатываемой детали и условия обработки;

$z_M, y_M, z_P, y_P$  – показатели степени;

$K_M, K_P$  – поправочные коэффициенты, учитывающие изменения условий обработки.

Согласно приведенным эмпирическим формулам стабилизация крутящего момента и осевой силы может быть достигнута путем регулирования подачи  $s$ , скорости  $v$  или обоих параметров одновременно. В существующих автоматических системах в качестве параметра регулирования используется в основном осевая подача  $s$ , оказывающая большее влияние на момент и силу резания, чем скорость резания  $v$ .

Крутящий момент в процессе сверления автоматически измеряется с помощью встроенного динамометрического узла и сравнивается с заданным предельным значением  $M_{кр.пр}$ . При возрастании крутящего момента происходит регулирование осевой подачи в сторону ее уменьшения, что приводит к стабилизации величины крутящего момента  $M_{кр} = M_{кр.пр} = \text{const}$ . Это означает, что на каждом участке заглубления система поддерживает оптимальное значение продольной подачи, при которой исключается недопустимая нагрузка на режущий инструмент.

Уменьшение величины осевой подачи происходит до задаваемого минимального значения  $s \Rightarrow s_{\min}$ , при котором дальнейшее заглубление сверла представляется нецелесообразным. При достижении осевой подачи минимального значения  $s = s_{\min}$  система выдает команду на вывод сверла из отверстия. При выводе инструмента происходит удаление стружки, а интенсивная подача СОЖ обеспечивает охлаждение инструмента. После этого осуществляется повторное заглубление сверла и начало сверления с наибольшего значения осевой подачи.

Таким образом, при наличии на станке системы адаптивного управления (САУ) процесс глубокого сверления осуществляется по оптимальному циклу, при котором действующая на инструмент нагрузка не превышает заданного значения и сверление осуществляется при наибольшем возможном значении осевой подачи. В результате достигается повышение производительности за счет уменьшения продолжительности цикла сверления, повышение стойкости инструмента и сохранение его целостности.

На рис. 6.25 приведены две полученные с помощью самописца диаграммы цикла глубокого сверления отверстий диаметром  $D = 2$  мм на глубину  $L = 44$  мм на сверлильном полуавтомате. Диаграмма на рис. 6.25, *а* показывает цикл работы сверлильной головки, оснащенной системой адаптивного управления, а диаграмма на рис. 6.25, *б* показывает работу обычной сверлильной головки по заданному жесткому циклу.

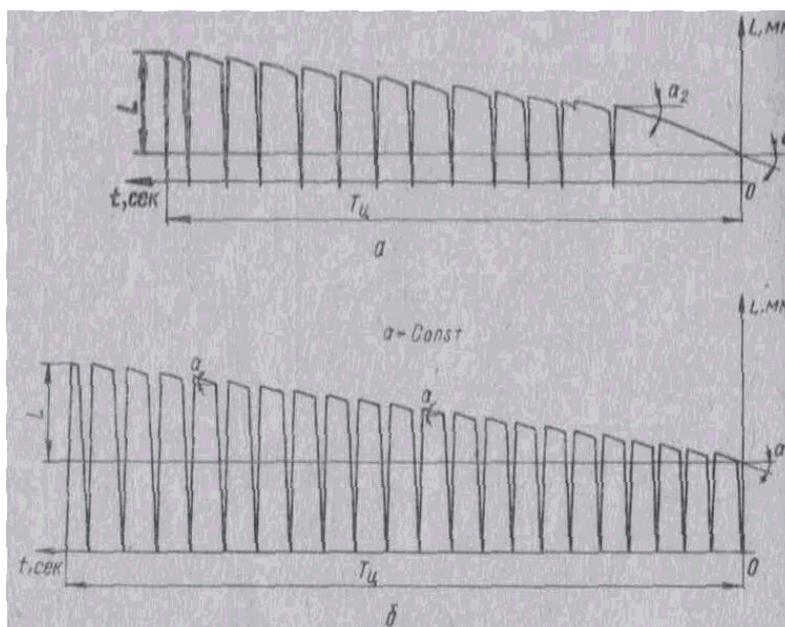


Рис. 6.25. Диаграммы цикла глубокого сверления отверстий на сверлильном полуавтомате: *а* – с системой адаптивного управления; *б* – обычным способом без системы по заданному жесткому циклу

На диаграммах по вертикали (координата  $L$ , мм) откладывается величина осевого перемещения вершины сверла в процессе каждого за-

глубления. При этом нулевая точка соответствует началу врезания инструмента в заготовку на первом заглублении. По горизонтали откладывается время ( $t$ , с), определяющее продолжительность сверления на каждом заглублении и продолжительность всего цикла получения глубокого отверстия.

Получение каждого заглубления на диаграммах отображается отрезком соответствующей линии. На диаграмме, представленной на рис. 6.25, б, все заглубления отображаются отрезками прямых линий, имеющих одинаковый угол наклона  $\alpha$  к горизонтальной оси. Тангенс угла наклона  $\alpha$  характеризует величину осевой подачи, с которой выполняется сверление. Наличие у всех отрезков прямых одинакового угла наклона  $\alpha = \text{const}$ , наглядно показывает, что процесс сверления, представленный на рис. 6.25, б, выполняется с постоянной подачей  $s = \text{const}$  обычным способом.

При сверлении с использованием САУ (см. рис. 6.25, б) получение каждого заглубления отображаются отрезком кривой линии. Угол  $\alpha$ , определяющий наклон касательных, проводимых к точкам кривой, является переменным, что означает изменение величины осевой подачи  $s = \text{varia}$  при сверлении с САУ. Угол наклона касательных  $\alpha_1$  в начальной точке кривой определяет величину подачи врезания  $\alpha_1 \Rightarrow s_{\text{вр}}$ , которая по величине превышает значение подачи, устанавливаемой при обычной обработке ( $\alpha_1 > \alpha$ ). В свою очередь, угол наклона касательных в конечной точке кривых  $\alpha_2$  определяет величину минимальной подачи  $\alpha_2 \Rightarrow s_{\text{min}}$ , при которой подается команда на вывод сверла из отверстия. Из диаграммы видно, что сверление на всех заглублениях начинается с наибольшим значением продольной подачи  $s_{\text{вр}}$ . По мере заглубления сверла величина продольной подачи уменьшается, обеспечивая стабилизацию момента  $M_{\text{кр}}$ .

Если при сверлении обычным способом (см. рис. 6.25, б) с одинаковой величиной заглубления  $l = 2$  мм величина продольной подачи остается постоянной, равной  $s = 0,02$  мм/об, то при сверлении с системой (см. рис. 6.25, а) она изменяется в соответствии с условиями процесса резания в пределах  $s = (0,042 - 0,025)$  мм/об.

В результате при выполнении цикла сверления на глубину  $L = 44$  мм с использованием САУ потребовалось выполнить 13 заглублений (13 выводов инструмента из отверстия), а при сверлении на ту же глубину без системы потребовалось произвести 22 вывода, то есть на девять

выводов больше, по сравнению с циклом при использовании САУ. Глубина сверления, получаемая на каждом заглублении при использовании САУ, показана в таблице:

Номер заглубления	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Величина заглубления	16	3,5	2,0	2,0	3,0	3,0	2,5	2,5	2,5	2,0	1,5	2,0	2,0

При первом заглублении, когда имеют место благоприятные условия резания, сверление, в основном, происходит с наибольшей подачей, и только лишь на последнем отрезке длиной 3 мм наблюдается уменьшение подачи. На последующих заглублениях относительная длина участка, проходимого с наибольшей подачей, уменьшается. На втором заглублении она равна 2,5 мм, на третьем 1,5 мм и т.д.

Таким образом, приведенные на рис. 6.25 диаграммы наглядно показывают характер изменения величины продольной подачи в процессе каждого заглубления, величину заглубления, количество выводов при сверлении на определенную глубину и время, затрачиваемое на выполнение резания и вспомогательных выводов сверла из отверстия.

Эффективность применения САУ наглядно показывает также серия проведенных экспериментов. Сверлились отверстия диаметром 2,2 мм на различных режимах резания с системой и без нее. Материал детали – сталь 12ХНЗА; глубина сверления 44 мм.

При обычной обработке по жесткому циклу с одинаковым заглублением  $l = 2$  мм,  $v = 14,8$  м/мин ( $n_{ш} = 2160$  об/мин),  $s = 0,02$  мм/об время цикла составило  $T_{ц} = 154$  с. При использовании САУ ( $M_{кр.пр.} = 3$  Н·м) время цикла при подачах  $s = 0,035 - 0,02$  мм/об уменьшилось в среднем до  $T_{ц} = 86,7$  с, а при  $s = 0,044 - 0,025$  мм/об продолжительность цикла составила  $T_{ц} = 75$  с.

При сверлении с большей скоростью ( $v = 19,3$  м/мин,  $n_{ш} = 2800$  об/мин) время цикла при обычной обработке с одинаковым заглублением  $l = 2$  мм и  $s = 0,020$  мм/об составило  $T_{ц} = 98,21$  с, а при использовании САУ ( $M_{кр.пр.} = 3$  Н·м,  $s = 0,042 - 0,025$  мм/об) время цикла уменьшилось в среднем до 56 с.

Описанные выше эксперименты проводились на сверильной головке, изготовленной на Харьковском заводе агрегатных станков, осна-

щенной механо-гидравлической адаптивной системой, разработанной в специальном конструкторском бюро агрегатных станков СКБ АС. Система предназначена для стабилизации крутящего момента при сверлении глубоких отверстий малого диаметра  $D = 2 \dots 5$  мм.

Крутящий момент в процессе сверления измеряется специальным динамометрическим устройством (рис. 6.26). С электродвигателя 1

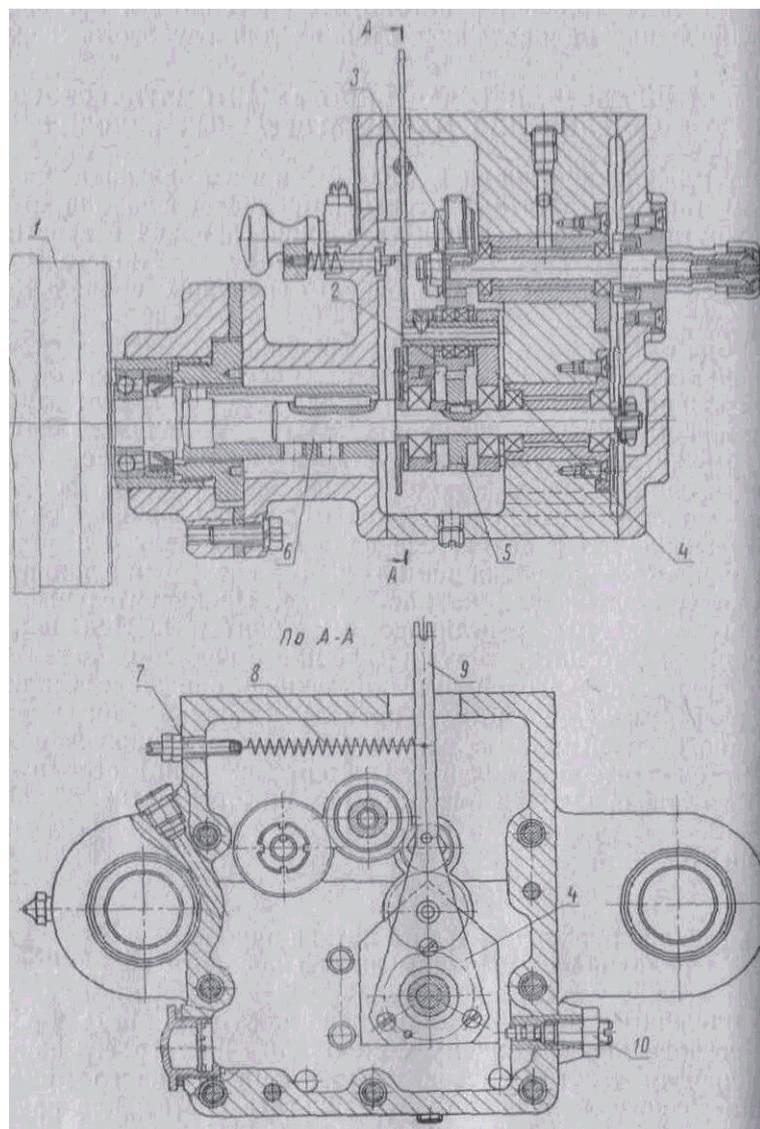


Рис. 6.26. Схема динамометрического узла для измерения крутящего момента при сверлении

крутящий момент передается на вал 6, а затем через зубчатое колесо 5, промежуточную шестерню 2 и колесо 3 на шпиндель станка. Промежуточная шестерня 2 установлена на водиле 4, смонтированном при помощи двух подшипников на валу 6. Таким образом, водило с промежуточной шестерней может поворачиваться на незначительный угол  $\beta$  вокруг оси вала 6. К водилу 4 неподвижно тремя винтами закреплена рамка 9. К последней прикреплен пружина 8, работающая на растяжение. Предварительный натяг пружины создается регулировочным винтом 7. Под действием предварительного

натяга пружины рамка с водилом стремится повернуться против часовой стрелки, однако вращение исключается регулируемым упором 10. В процессе резания при вращении сверла по часовой стрелке водило 4 вместе с рамкой 9 под действием момента сопротивления (момента реакции) стремится повернуться влево. Однако повороту рамки пре-

пятствует заданный момент  $M_{кр.пр.}$ , получаемый в результате предварительного натяга пружины 8:

$$M_{кр.пр.} = F \cdot E,$$

где  $F$  – усилие предварительного натяга пружины;

$E$  – расстояние от пружины до оси поворота водила.

Момент реакции равен по величине крутящему моменту на сверле. Если момент реакции возрастает выше  $M_{кр.пр.}$  происходит растяжение пружины и поворот рамки влево на угол  $\beta$ . Эти перемещения через рычаг передаются на штока гидрозолотника, обеспечивающего изменение величины осевой подачи. Равновесие наступает в том случае, когда сумма заданного момента и дополнительного, получаемого в результате растяжения пружины, будет равна крутящему моменту на сверле.

Быстродействие электрогидравлической схемы станка, обеспечивающей отвод сверлильной головки при подаче сигнала от индуктивного датчика о достижении минимального значения осевой подачи  $s = s_{min}$ , составляет 0,07...0,08 с.

В ряде случаев станки для глубокого сверления оснащают устройствами автоматической защиты сверл от перегрузок. С помощью такого устройства в процессе сверления с постоянной подачей ( $s = const$ ) измеряется крутящий момент и при его увеличении до заданного  $M_{кр.пр}$  подается команда на вывод инструмента из отверстия. В результате, также как и при использовании САУ, отпадает необходимость программирования цикла периодического вывода сверла из отверстия.

Применение на станках устройств защиты сверл по крутящему моменту  $M_{кр}$  также позволяет повысить производительность обработки и увеличить стойкость сверл по сравнению с обычной обработкой. Однако получаемый при этом эффект повышения производительности и стойкости инструмента меньше, чем при использовании САУ.

## **6.5. Выбор источников информации в системах управления процессом обработки на станках**

Во всех адаптивных системах, обеспечивающих управление технологическим процессом относительно одной или нескольких регулируемых величин, важным является вопрос систематического получения информации, характеризующей истинное состояние процесса. Получаемая информация должна иметь комплексный характер и непрерывно поступать непосредственно в процессе выполнения операции. Так как

обработку деталей выполняют, как правило, на высоких режимах резания, а процесс нарастания нагрузок и образования погрешностей происходит соответственно в десятые и сотые доли секунды, то становится понятной необходимость получения потока информации с минимальным временем запаздывания.

Состояние технологической системы во время выполнения процесса обработки характеризует комплекс величин: точность обрабатываемой детали  $T \geq \omega$ , потребляемая мощность  $N$  и ток  $I$  в электродвигателе; нагрузки, действующие в системе, в том числе сила резания  $P$  и крутящий момент  $M_{кр}$  и порождаемые ими упругие перемещения  $A_d$ ; температурный режим системы  $\theta^\circ$  и интенсивность износа режущего инструмента  $h$ ; уровень вибраций и характер стружкообразования. Все эти параметры представляют собой переменные состояния системы. Они образуют вектор состояния технологической системы

$$\psi = (T, N, I, P, M_{кр}, A_d, \theta^\circ, h, \mu, \dots).$$

Колебания глубины резания  $t$ , изменения твердости НВ обрабатываемого материала заготовки, переменная жесткость системы  $j$  и различная режущая способность инструмента  $h_3$  являются основными возмущающими факторами, образующими соответствующий вектор

$$v = (t, НВ, j, h_3, \dots).$$

Воздействие на технологическую систему в процессе регулирования осуществляется через переменные управления. Такими переменными являются подача  $s$ , скорость резания  $v$ , размер статической настройки  $A_c$ . В определенных случаях в качестве переменных управления могут быть выбраны жесткость системы  $j$  или геометрия резания, изменяемые с помощью специально встраиваемых исполнительных устройств, а также определенные колебания, специально налагаемые на элементы системы. Управляющие переменные образуют соответственно вектор управления, имеющий в общем случае следующий вид:

$$U = (s, v, A_c, j, \dots).$$

В соответствии с технологическими возможностями системы, требованиями точности обработки, допускаемыми нагрузками и условиями нормального протекания процесса на переменные состояния и управления накладываются некоторые ограничения. Эти ограничения либо определяют область допустимых значений переменных, либо устанавливают дополнительные зависимости между переменными состояниями и управлениями.

В системах предельного регулирования, предназначенных для управления процессом черновой и предварительной обработок, когда стремятся к максимальному использованию мощности оборудования, ограничения относятся главным образом к силовым параметрам действующей в системе нагрузки. В системах предельного регулирования, обеспечивающих управление процессом чистовой и получистовой обработок деталей, налагаемые ограничения, образующие систему неравенств, относятся непосредственно к параметрам, определяющим достижение требуемой точности детали в качестве переменных управления. В системах предельного регулирования используют главным образом параметры режима резания – подачу  $s$  и скорость  $v$ . При этом согласно принятому алгоритму управления возможно регулирование по определенному закону одной или одновременно несколькими переменными. Для этого необходимо представить переменные состояния и ограничения как функции от переменных управления.

Путем регулирования продольной подачи обычно поддерживают в пределах заданных ограничений определенные значения упругих перемещений, потребляемой мощности, тока, силы резания, крутящего момента и других переменных состояния:

$$A_{д\max} - A_{д\min} \leq \delta_T; N \leq N_{пр}; \\ I \leq I_{пр}; P \leq P_{пр}; M_{кр} \leq M_{кр. пр}; A_{д} \leq A_{д пр},$$

где  $\delta_T$  – допуск, ограничивающий мгновенное поле рассеяния  $\omega_T$ ;

$N_{пр}, I_{пр}$  – допускаемые предельные значения мощности и силы тока;

$P_{пр}, M_{кр. пр}$  – допускаемые предельные значения силы резания и крутящего момента.

Одну из переменных состояния принимают при этом в качестве главной регулируемой величины. Это означает, что закон изменения продольной подачи в большей части диапазона регулирования обеспечивает постоянство данной регулируемой величины.

Например, при тчении с постоянной мощностью резания продольная подача изменяется:

$$s = \left| \frac{kN}{t^{x_z} v^{n_z}} \right|^{1/y_z}, \quad (6.12)$$

где  $N$  – заданная мощность резания;

$k$  – коэффициент ( $k = (60 \cdot 102) / C_z$ );

$x_z, y_z, n_z, C_z$  – показатели степени и коэффициент в формуле, определяющей главную составляющую силы резания  $P_z$ .

Однако если при допустимой мощности резания одна из переменных состояния, например сила или крутящий момент на шпинделе  $M_{кр}$ , достигают предельного значения, происходит дополнительное изменение подачи, в результате чего исключается возможность превышения заданных ограничений. Закон изменения подачи в этом случае отличается от приведенной выше формулы (6.12) и обеспечивает постоянство крутящего момента  $M_{кр} = M_{кр. пр}$  или другой регулируемой величины, достигающей предельного значения.

Если переменная управления достигает заданных ограничений, обусловленных, например, требованиями шероховатости поверхности  $s_{\nabla}$  или условиями стружкообразования, то она становится постоянной величиной, равной заданному пределу  $s \leq s_{\nabla}$ .

Скорость резания в системах предельного регулирования может поддерживаться на заданном уровне или изменяться по определенному закону. Постоянство скорости резания при точении ( $v = \text{const}$ ) обеспечивается путем бесступенчатого регулирования частоты вращения шпинделя  $n$  в соответствии с изменением радиуса  $R$  резания:

$$n = q \cdot v_3 / R,$$

где  $v_3$  – заданная скорость резания;

$q$  – коэффициент ( $q = 1000/2\pi$ ).

Поддержание в процессе обработки постоянной скорости резания является дополнительным резервом повышения производительности за счет уменьшения основного технологического времени. Как переменная управления скорость резания может быть использована для поддержания требуемой мощности  $N$ , для управления температурой резания  $\theta^\circ$  и интенсивностью износа режущего инструмента  $h$ .

Изменение скорости резания для поддержания заданной мощности  $N$  при различных значениях  $t$  и  $s$  определяется выражением

$$v = \left| \frac{k \cdot N}{t^{x_z} \cdot s^{y_z}} \right|^{1/n_z},$$

где  $N$  – заданная величина мощности резания, кВт;

$k$  – коэффициент, см. формулу (6.12).

На рис. 6.27 в качестве примера представлена область допустимых значений режима резания (скорости и подачи) при обработке валиков на токарном гидрокопировальном полуавтомате. Область возможных значений скорости  $v$  и подачи  $s$  ограничена пределами допускаемой мощ-

ности  $N_{пр}$ , допускаемым крутящим моментом  $M_{кр.маx}$ , допускаемой силой  $P_{пр}$  и ограничениями, налагаемыми на переменные управления  $s$  и  $v$ .

Наибольшее допускаемое значение мощности  $N_{пр}$ , при которой станок работает в режиме полной загрузки, может быть достигнуто при различных сочетаниях скорости резания и продольной подачи. Допустимый диапазон изменения подачи составляет при этом 0,4...0,8 мм/об, а допустимый диапазон изменения скорости резания – 75...145 м/мин. При обработке с постоянной предварительно выбранной скоростью резания  $v = 105$  м/мин рабочая точка при фиксированной глубине резания соответствует продольной подаче  $s = 0,55$  мм/об. При изменении глубины резания в сторону уменьшения до  $t_2 < t_1$  линия I предельного значения мощности резания смещается и занимает положение II. В соответствии с этим рабочая точка смещается в сторону большей подачи  $s = 0,63$  мм/об.

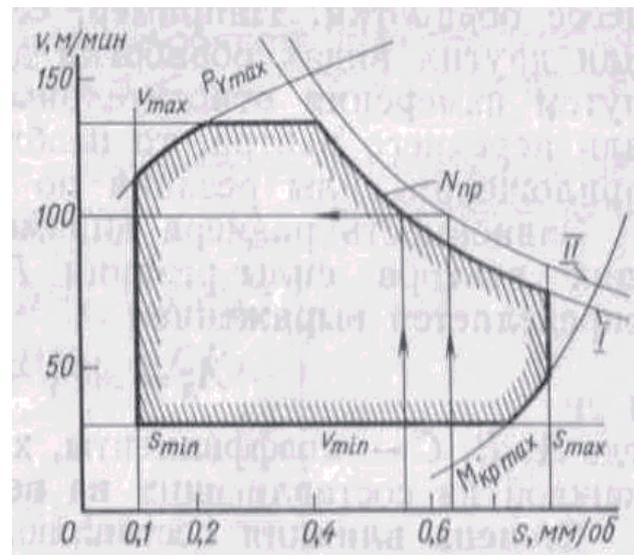


Рис. 6.27. Область допустимых значений режимов резания при точении

При подаче  $s = 0,4$  мм/об, когда происходит точение с  $N = N_{пр}$ , вступает в силу ограничение верхнего значения скорости резания  $v_{маx} = 145$  м/мин. Ограничение верхнего значения подачи  $s_{маx} = 0,8$  мм/об, обусловленное требованием шероховатости поверхности, наступает при  $v = 75$  м/мин. Предельные значения крутящего момента  $M_{кр.маx}$  могут быть достигнуты при точении на малых скоростях резания и большой продольной подаче, когда резко возрастает главная составляющая  $P_z$  силы резания.

При подаче  $s = 0,4$  мм/об, когда происходит точение с  $N = N_{пр}$ , вступает в силу ограничение верхнего значения скорости резания  $v_{маx} = 145$  м/мин. Ограничение верхнего значения подачи  $s_{маx} = 0,8$  мм/об, обусловленное требованием шероховатости поверхности, наступает при  $v = 75$  м/мин. Предельные значения крутящего момента  $M_{кр.маx}$  могут быть достигнуты при точении на малых скоростях резания и большой продольной подаче, когда резко возрастает главная составляющая  $P_z$  силы резания.

В определенных условиях обработки возможно возрастание составляющей  $P_y$  до значения, при котором происходят недопустимые отклонения точности на замыкающем звене. В соответствии с этим также происходит регулирование подачи, что исключает превышение  $P_y \leq P_{y\max}$ .

В соответствии с решаемой технологической задачей информацию о ходе выполнения процесса получают путем измерения различных переменных. Так, в системах, управляющих точностью установки, измеряют составляющие вектора погрешности установки  $\omega_y = (a_y, b_y, c_y, \lambda_y, \beta_y, \gamma_y)$ . В системах коррекции размера статической настройки  $A_c$  в исхо-

дном положении измеряют параметры, определяющие точность положения инструмента относительно базирующих поверхностей приспособления или станка. Эти параметры в общем случае образуют вектор статической настройки:

$$k_c = (A_c, B_c, \Gamma_c, \lambda_c, \beta_c, \gamma_c).$$

Информацию о размере динамической настройки  $A_d$  необходимо получать непосредственно в процессе резания, что представляет наибольшие трудности. Для определения размера динамической настройки и его отклонений наилучшим является непосредственное измерение расстояния между режущими кромками инструмента и базами станка, определяющими положение обрабатываемой детали. Однако прямое измерение упругого перемещения непосредственно на замыкающем звене затруднительно.

Одним из возможных способов определения  $A_d$  является измерение относительного упругого перемещения двух сопряженных деталей, размеры которых входят в качестве звеньев в соответствующую технологическую или кинематическую цепь системы. В этом случае выбор источника получения информации сводится к нахождению такого стыка, упругие деформации которого наиболее полно отражают характер упругих перемещений на замыкающем звене. При этом необходимо учитывать передаточные отношения соответствующих звеньев, которые меняются в процессе обработки. Например, если при токарной, шлифовальной или других видах обработки деталей в центрах определять  $A_d$  путем измерения относительных упругих перемещений заднего или переднего центра, то необходимо учитывать смещение точки приложения силы резания по длине детали.

Зависимость размера динамической настройки  $A_d = Y_\Delta$  от составляющих вектора силы резания  $P = (P_y, P_x, P_z)$  в общем случае определяется выражением

$$Y_\Delta = A \cdot P_y + B \cdot P_x + C \cdot P_z, \quad (6.13)$$

где  $A, B, C$  – коэффициенты, характеризующие степень влияния каждой составляющей на величину упругого перемещения  $Y_\Delta$ , формируемого на замыкающем звене.

Степень влияния составляющих силы резания на величину упругого перемещения зависит от размеров обрабатываемой детали, координаты точки приложения силы резания и характера деформаций отдельных узлов станка в направлении образования размеров детали.

Трудность прямого измерения размера  $A_d$  заставляет прибегать к более простым, косвенным методам измерения. В общем случае задача сводится к отысканию такой переменной величины, значения которой были бы пропорциональны изменению  $A_d = Y_{\Delta}$ .

Для определения коэффициентов  $A, B, C$ , характеризующих степень влияния составляющих силы резания на размер  $A_d$ , может быть использована следующая методика.

Составляют систему из  $n$  условных уравнений:

$$Y_{\Delta 1} = A \cdot P_{y1} + B \cdot P_{x1} + C \cdot P_{z1},$$

$$Y_{\Delta 2} = A \cdot P_{y2} + B \cdot P_{x2} + C \cdot P_{z2},$$

.....

$$Y_{\Delta n} = A \cdot P_{yn} + B \cdot P_{xn} + C \cdot P_{zn}.$$

Каждое из уравнений приведенной системы определяет соответствие между величиной упругого перемещения  $Y_{\Delta n}$  на замыкающем звене и составляющими силы резания  $P_{yn}, P_{xn}, P_{zn}$ , под действием которых оно формируется. Для составления такой системы уравнений необходимо проведение серии экспериментов при различных режимах резания по определению величины упругого перемещения  $Y_{\Delta}$  и соответствующих значений составляющих силы резания. Диапазон режимов резания  $t, s, v$  должен соответствовать технологическому диапазону станка.

Наиболее точное значение искомым коэффициентов  $A, B, C$  находят исходя из минимума суммы квадратов отклонений:

$$F = \sum_{i=1}^{i=n} [Y_{\Delta i} - (A \cdot P_{yi} + B \cdot P_{xi} + C \cdot P_{zi})]^2 = \min$$

Взяв частные производные  $\frac{\partial F}{\partial A} = 0; \frac{\partial F}{\partial B} = 0; \frac{\partial F}{\partial C} = 0$  и приравняв их к нулю, получим систему трех уравнений

$$\begin{vmatrix} \sum_{i=1}^{i=n} Y_{\Delta} \cdot P_{yi} \\ \sum_{i=1}^{i=n} Y_{\Delta} \cdot P_{xi} \\ \sum_{i=1}^{i=n} Y_{\Delta} \cdot P_{zi} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \sum_{i=1}^{i=n} P_{yi}^2 & \sum_{i=1}^{i=n} P_{yi} \cdot P_{xi} & \sum_{i=1}^{i=n} P_{yi} \cdot P_{zi} \\ \sum_{i=1}^{i=n} P_{xi} \cdot P_{yi} & \sum_{i=1}^{i=n} P_{xi}^2 & \sum_{i=1}^{i=n} P_{xi} \cdot P_{zi} \\ \sum_{i=1}^{i=n} P_{zi} \cdot P_{yi} & \sum_{i=1}^{i=n} P_{zi} \cdot P_{xi} & \sum_{i=1}^{i=n} P_{zi}^2 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} A \\ B \\ C \end{vmatrix},$$

решение которой составит

$$A = \frac{\Delta_A}{\Delta}; B = \frac{\Delta_B}{\Delta}; C = \frac{\Delta_C}{\Delta}$$

где  $\Delta$ ;  $\Delta_A$ ;  $\Delta_B$ ;  $\Delta_C$  – определители системы согласно правилу Крамера.

На основе рассчитанных коэффициентов  $A$ ,  $B$ ,  $C$  выбирают местостройки и разрабатывают конструкцию динамометрического узла.

Так, например, для гидрокопировальных станков модели 1722 соотношение коэффициентов  $A$ ,  $B$ ,  $C$ , полученное в результате расчета, составляет  $A : B : C = 1 : (-0,564) : 0,269$ . Приведенное соотношение показывает, что наибольшее влияние на величину упругого перемещения оказывает радиальная составляющая силы резания  $P_y$ . Действие составляющих  $P_y$ ,  $P_z$  приводит к увеличению упругого перемещения в направлении образования радиального размера, а действие  $P_x$  – к уменьшению. Анализ показывает, что уменьшение  $U_\Delta$  происходит вследствие разворота детали и суппорта. Погрешность линеаризации, обусловленная различной жесткостью системы у передней и задней бабки для станка модели 1722, составляет 8...12 %.

Для рассматриваемого станка модели 1722 динамометрический узел был выполнен как обычная резцедержавка, имеющая специальный разрез, размеры и расположение которого определяются расчетом (см. рис. 6.20, 6.23). Разрез делит державку на две части – подвижную и неподвижную, связанные между собой упругой перемычкой. Неподвижная часть крепится четырьмя винтами к суппорту, а на подвижной части устанавливается резец. На обеих частях державки устанавливают кронштейны с регулировочным винтом и индуктивным датчиком. В процессе обработки под действием составляющих сил резания происходит упругая деформация державки. Величина деформации, измеряемая индуктивным датчиком, пропорциональна относительному упругому перемещению резца и обрабатываемой детали.

Измерение составляющих вектора силы резания существенно упрощается при использовании в опорах шпинделя гидростатических подшипников. Сущность подобного способа определения составляющих заключается в измерении колебания давления масла в соответствующих карманах гидростатического подшипника. На рис. 6.28 представлена схема измерения радиальной составляющей  $P_y$  при патронной токарной обработке. Передняя и задняя опоры шпинделя токарного станка выполнены на гидростатических подшипниках 1 и 2. Реакция в передней опоре определяется по формуле

$$R_{II} = (p_2 - p_1) \cdot F_p,$$

где  $p_1$  и  $p_2$  – давление масла в карманах подшипника, Па;

$F_{\Pi}$  – площадь опоры, см<sup>2</sup>.

Составляющая  $P_y$  определяется с учетом расстояния между двумя точками приложения силы резания согласно выражению

$$P_y = R_{\Pi} \frac{a}{a + b}.$$

Давление масла в соответствующих карманах подшипника измеряется при помощи индуктивных или тензометрических датчиков давления 3 и 4. В блоке 5 определяется разность давления, на основании которой в блок 6 производит вычисление реакции  $R_{\Pi}$  и усилия  $P_y$ .

Полученное значение составляющей  $P_y$  подается на регистрирующий прибор 7. Согласно приведенному выше выражению при такой схеме измерения составляющей  $P_y$  необходимо фиксировать расстояние  $a$  от точки приложения силы резания до передней опоры.

Процесс обработки на станках связан с потреблением энергии привода, поэтому изменение натяга в технологической системе, обусловленное изменением нагрузки и колебанием вектора силы резания, находит свое отражение в изменении ряда параметров электро- и гидропривода станка. Это дает возможность получать информацию о нагрузке, действующей в системе, и изменении размера динамической настройки путем измерения в процессе обработки таких параметров, как мощность  $N$  двигателя главного движения, силы тока в фазах двигателя, изменение давления масла  $p$  в полостях силовых цилиндров и др.

На рис. 6.29 представлен график, на котором показан характер изменения давления масла  $p$  (Па) в полости продольного гидроцилиндра, тока  $I$  (А) и мощности главного двигателя  $N$  (кВт) в соответствии с изменением глубины резания при обработке детали на токарном гидрокопировальном полуавтомате. График наглядно показывает, что рассматриваемые параметры  $N$ ,  $p$ ,  $I$  монотонно изменяются соответственно

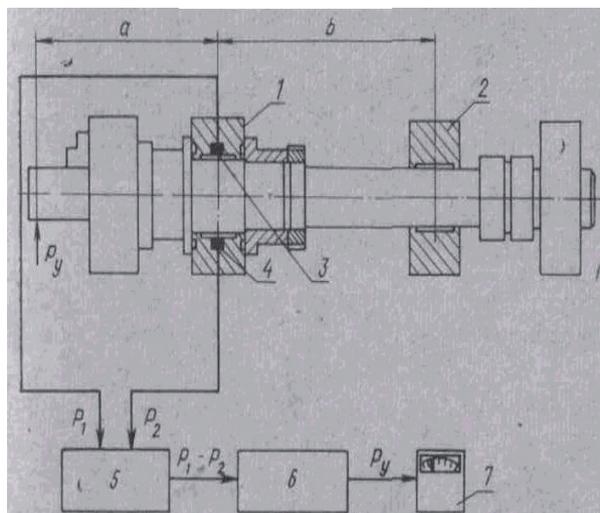


Рис. 6.28. Схема измерения радиальной составляющей  $P_y$  при патронной токарной обработке

приращению глубины резания. При колебании глубины резания от 2 до 6 мм давление масла в сливной полости гидроцилиндра изменяется

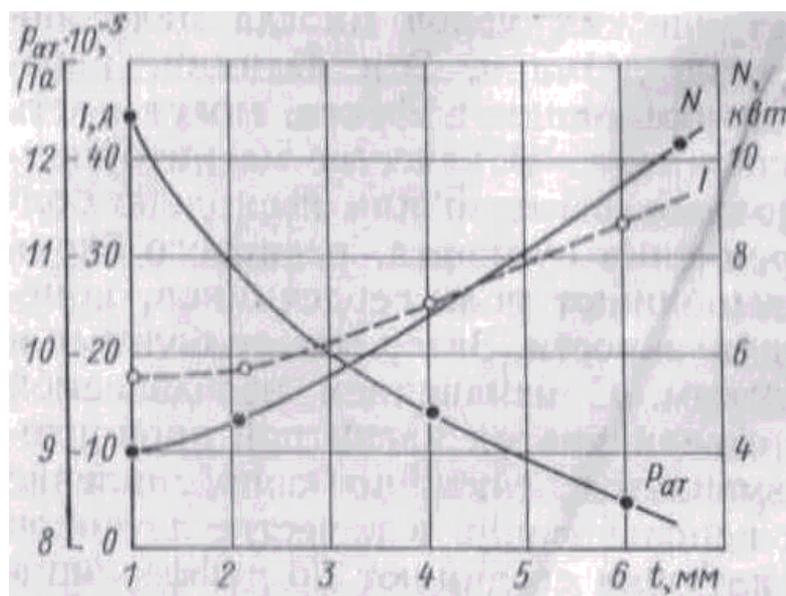


Рис. 6.29. График изменения давления масла  $p$  в полости продольного гидроцилиндра, тока  $I$  и мощности главного двигателя  $N$  в соответствии с изменением глубины резания

на  $3,5 \times 10^5$  Па (3,5 ат), а ток и мощность двигателя соответственно на 15 А и 9 кВт. Основным преимуществом подобных способов получения информации о  $A_d$  является простота и надежность измерения. Кроме того, нет необходимости в разработке динамометрических узлов и встройке их в станок. Для измерения мощности двигателя используют элект-

трические датчики мощности, для измерения тока в фазе применяют трансформаторы тока, а для измерения давления масла – датчики давления. Использование этих датчиков не влияет на работу станка и не требует конструктивных изменений его узлов.

Информация, получаемая о размере  $A_d$  путем измерения мощности тока или колебания давления масла, является достаточно достоверной, так как эти параметры функционально связаны с одной из составляющих вектора силы резания, а следовательно, и с величиной упругого перемещения  $A_d \equiv Y_\Delta$  на замыкающем звене.

Степень достоверности и полноты получаемой информации для решения поставленной задачи повышения точности и производительности обработки необходимо определять в каждом конкретном случае.

Эффективная мощность резания определяется из выражения

$$N_3 = \frac{P_z \cdot v}{60 \cdot 102},$$

из которого видно, что при постоянной скорости резания мощность пропорциональна главной составляющей силы резания  $N_3 = k \cdot P_z$ .

Когда изменение таких параметров, как напряжение  $U$ ,  $\cos \phi$ , ко-

эffiциент полезного действия  $\eta$  в пределах 10 – 15% не оказывает существенного влияния на решение поставленной задачи управления, то можно считать, что между  $P_z$  и током пропорциональная зависимость  $P_z \equiv I$ , а следовательно, по изменению тока можно судить об изменении составляющей  $P_z$ . Для измерения колебания силы тока в двигателе применяют трансформаторы тока, которые могут подключаться как в одну, так и в три фазы питания двигателя.

Использование на гидрофицированном станке в качестве источника информации колебания давления масла в полости сливного гидроцилиндра или гидромотора позволяет создать наиболее простую гидравлическую систему управления. Изменение давления масла в данном случае характеризует отклонения продольной составляющей  $P_x$  вектора силы резания. При увеличении силы  $P_x$  на штоке цилиндра давление в сливной полости уменьшается, а при уменьшении  $P_x$  давление возрастает.

### Вопросы для самопроверки

1. Что следует понимать под понятием «настройка технологической системы»?
2. Что означает рабочий настроечный размер?
3. В чем заключается сущность настроек технологической системы на изготовление одной детали и партии деталей?
4. Как рассчитать рабочие настроечные размеры для изготовления одной детали и партии деталей?
5. Какие факторы определяют формирование мгновенного поля рассеяния размеров  $\omega_t$ ?
6. В чем заключается сущность производственного метода определения мгновенного поля рассеяния размеров?
7. Что следует понимать под понятием «поднастройка технологической системы»?
8. Когда возникает необходимость выполнения размерной поднастройки технологической системы и в чем заключается ее сущность?
9. Что означает понятие «активный контроль»?
10. Какие измерительные системы позволяют осуществлять автоматический контроль точности деталей на рабочем месте?
11. На каком станочном оборудовании применяют системы автоматического контроля точности деталей на рабочем месте?

12. Какие параметры точности деталей можно измерить с использованием системы автоматического контроля на рабочем месте?
13. Какие технологические задачи позволяют решить автоматические системы управления точностью на этапе установки и статической настройки?
14. В чем заключается сущность автоматического управления точностью на этапе установки?
15. С какой целью выполняется автоматическая коррекция точности статической настройки в исходном положении?
16. Какими способами можно осуществить управление точностью обработки на станках в процессе резания?
17. Как называются системы, осуществляющие автоматическое управление точностью обработки на станках в процессе резания?
18. В чем заключается сущность управления точностью и производительностью обработки путем регулирования подачи?
19. В чем заключается сущность управления точностью в процессе резания путем регулирования размеров статической настройки?
20. Что означает комплексное управление точностью статической и динамической настройками технологической системы?
21. В чем заключается сущность адаптивного управления процессом глубокого сверления отверстий?
22. Какие основные блоки включают системы адаптивного управления на станках?
23. Назовите основные источники информации, используемые в системах адаптивного управления на станках.
24. Какие управляемые переменные могут быть использованы при создании систем адаптивного управления на станках?

## **Глава 7. РАСЧЕТ ПРИПУСКОВ И ОПЕРАЦИОННЫХ РАЗМЕРОВ. МЕТОДЫ ПОЛУЧЕНИЯ ЗАГОТОВОК ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН**

Под *припуском* понимается слой материала, снимаемый с заготовки в результате выполнения одного или нескольких технологических переходов при обработке определенной поверхности. Размер, получаемый на детали после удаления припуска на заданном переходе, называется *межпереходным*. В свою очередь, размер на детали, получаемый после удаления припуска на определенной операции, называется *операционным*.

Таким образом, расчет припусков на обработку тесно связан с установлением промежуточных межпереходных, операционных размеров и исходных размеров заготовки, которые необходимо знать:

- для выбора метода получения заготовки;
- конструирования станочных приспособлений;
- выбора режущих и мерительных инструментов;
- конструирования штампов, пресс-форм, литейных моделей, форм и другой технологической оснастки;
- настройки металлорежущих станков и другого технологического оборудования;
- обоснованного выбора методов обработки, режимов резания и установления норм времени на выполнение технологических операций.

Правильное назначение припусков во многом определяет эффективность принятых технологических решений. Завышенные припуски приводят к излишнему расходу материала, увеличению трудоемкости изготовления деталей, повышенному расходу электроэнергии и режущего инструмента, следствием чего является повышение себестоимости изделия. В свою очередь, заниженные припуски не позволяют обеспечить требуемое качество изготавливаемых деталей и приводят к получению брака.

### **7.1. Расчетноаналитический и табличный методы определения припусков**

В настоящее время в машиностроении применяются два метода установления припусков на обработку – опытно-статистический и расчетно-аналитический.

При опытно-статистическом методе припуски устанавливают по таблицам, которые составлены на основе обобщения практических данных, полученных на передовых заводах. Недостатком этого метода является то, что припуски назначают без учета конкретных условий построения технологических процессов. Так, например, общие припуски назначают без учета маршрута обработки данной поверхности, а промежуточные – без учета схемы установки заготовки и погрешностей предшествующей обработки. В связи с этим опытно-статистические припуски во многих случаях, как правило, завышены, так как они ориентированы на условия обработки, при которых припуск должен быть наибольшим во избежание брака.

Расчетно-аналитический метод определения припусков является более трудоемким, однако он лишен указанных недостатков. Основы аналитического метода определения припусков были разработаны доктором технических наук, профессором В.М. Кованом. В соответствии с этим методом промежуточный припуск, назначаемый для определенного перехода, должен быть таким, чтобы при его снятии устранялись погрешности обработки и дефекты поверхностного слоя, полученные на предшествующем технологическом переходе, а также погрешность установки обрабатываемой заготовки, возникающая на выполняемом переходе. Этот метод базируется на учете конкретных условий выполнения технологического процесса. Он позволяет выявить возможности экономии материала и снижения трудоемкости механической обработки.

Расчету припусков на механическую обработку предшествует важный этап разработки технологического процесса – выбор метода получения заготовки. Метод получения заготовки выбирают с учетом программы выпуска, марки материала, габаритов и геометрии изделия. Зная метод получения заготовки, возможно по справочным данным определить качество, предельные отклонения  $ES_{\text{заг}}$  ( $es_{\text{заг}}$ ),  $EI_{\text{заг}}$  ( $ei_{\text{заг}}$ ) и допуск  $T_{\text{заг}}$  на рассматриваемый размер заготовки. Данные по точности заготовок, получаемых литьем, ковкой, штамповкой и прокатом, приведены в справочниках [25, 22]. При этом номинальный размер заготовки  $A_{\text{заг}}$  первоначально, до расчета, можно принять с определенным приближением исходя из размера детали  $A_{\text{дет}}$ .

Размеры детали, заготовки, операционные и межпереходные размеры образуют соответствующие технологические размерные связи, которые на примере изготовления вала показаны на рис. 7.1.

Номинальный диаметр заготовки  $D_{\text{заг}}$  рассчитывают путем прибавления к номинальному диаметру детали  $D_{\text{дет}}$  удвоенных припусков  $ZI$ ,

$Z_2, Z_3$ , назначенных на соответствующую операцию или переход:

$$D_{\text{заг}} = D_{\text{дет}} + 2Z_3 + 2Z_2 + 2Z_1.$$

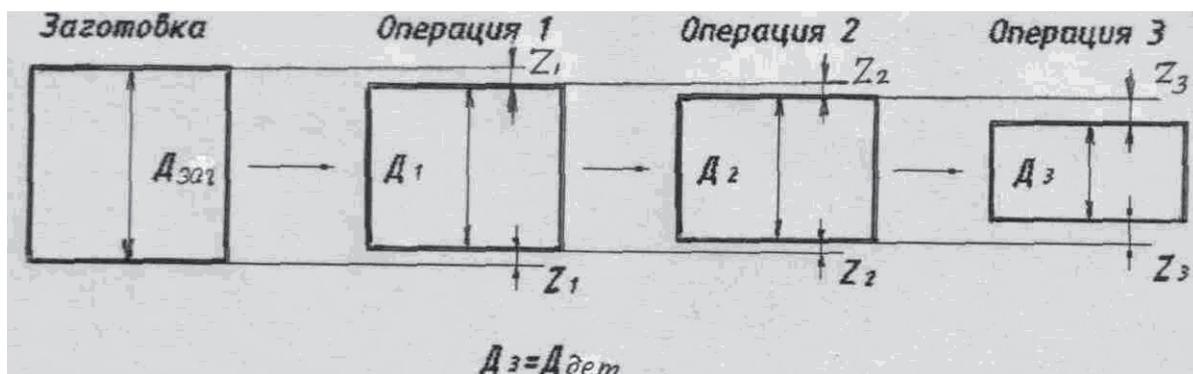


Рис. 7.1. Технологические размерные связи, образуемые при снятии припусков на детали типа «вал»

В свою очередь, операционные (межпереходные) размеры, подлежащие контролю по окончании операции, составляют:

- на операции № 3  $D_3 = D_{\text{дет}}$ ;
- на операции № 2  $D_2 = D_{\text{дет}} + 2Z_3$ ;
- на операции № 1  $D_1 = D_{\text{дет}} + 2Z_3 + 2Z_2$ .

В зависимости от схемы расположения (рис. 7.2) различают припуск односторонний (рис. 7.2, а), двусторонний, который может быть симметричным при  $Z_1 = Z_2$  (рис. 7.2, б) и несимметричным при  $Z_1 \neq Z_2$

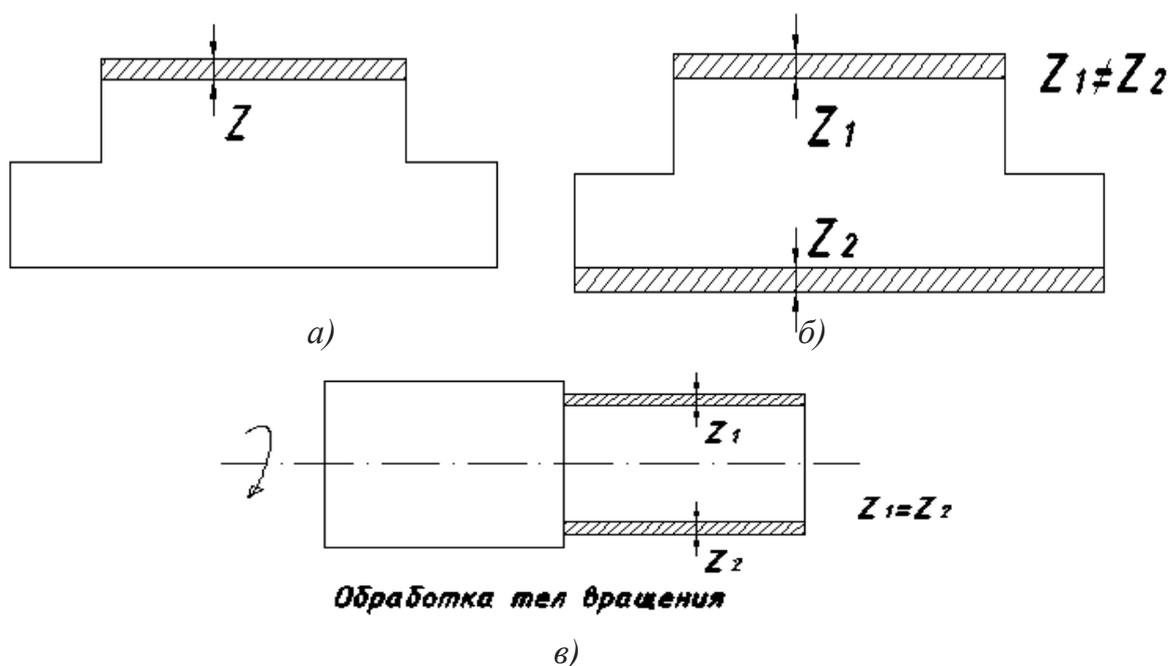


Рис. 7.2. Схемы расположения припусков на заготовках: а – припуск односторонний; б – припуск двусторонний симметричный; в – двусторонний симметричный припуск на цилиндрической поверхности вала

$Z_2$  (рис. 7.2, в). При обработке наружных и внутренних цилиндрических поверхностей вращения имеет место двусторонний симметричный припуск  $Z_1$ .

Определение припусков расчетно-аналитическим методом необходимо выполнять по этапам в определенной последовательности [22]:

1. Определение состава и количества технологических переходов (операций), необходимых для обработки данной поверхности.

2. Расчет наименьших припусков для предусмотренных переходов  $Z_{\min}$ .

3. Расчет наибольших припусков для предусмотренных переходов  $Z_{\max}$ .

4. Расчет номинальных припусков для предусмотренных переходов  $Z_H$ .

5. Расчет межпереходных, операционных размеров и размеров заготовки.

*Состав и количество технологических переходов (операций), необходимых для обработки данной поверхности, определяют путем расчета уточнений. Зная допуск на размер изготавливаемой детали  $T_{\text{дет}}$  и допуск на соответствующий размер заготовки  $T_{\text{заг}}$ , определяют требуемую величину уточнения:*

$$\varepsilon_m = \frac{T_{\text{заг}}}{T_{\text{дет}}}, \quad (7.1)$$

Допуск на размер заготовки  $T_{\text{заг}}$  находят из соответствующих таблиц [25], для чего необходимо выбрать метод получения заготовки и с первым приближением определить ее номинальный размер.

Затем подбирают технологические переходы, выполнение которых обеспечит достижение требуемой точности детали. Подбор технологических переходов осуществляют в обратной последовательности выполнения технологического процесса, идя от требований изготавливаемой детали к заготовке. Так например, требуемую точность диаметрального размера вала (квалитет  $IT7$ , шероховатость поверхности  $R_z = 0,8$  мкм), достигаемую на последнем переходе, можно обеспечить путем чистового шлифования на круглошлифовальном станке. Этому переходу должно предшествовать предварительное круглое шлифование. В свою очередь, предварительное шлифование выполняют после чистовой токарной обработки, которой предшествует черновое точение, выполняемое по заготовке. Таким образом, в результате анализа выяв-

лено четыре необходимых перехода: 1 – черновое точение, 2 – чистовое точение, 3 – предварительное круглое шлифование, 4 – чистовое шлифование, для которых по таблицам (табл. 7.2) определяют достигаемые параметры точности (допуски на получаемые межпереходные размеры –  $T_1, T_2, T_3, T_4$ ; шероховатость поверхности  $R_z$ , глубину дефектного слоя  $h$ ). Это позволяет рассчитать уточнения размеров, получаемые на каждом выбранном переходе:

$$\varepsilon_4 = \frac{T_3}{T_{\text{дет}}}; \varepsilon_3 = \frac{T_2}{T_3}; \varepsilon_2 = \frac{T_1}{T_2}; \varepsilon_1 = \frac{T_{\text{заг}}}{T_1}, \quad (7.2)$$

и определить общее уточнение  $\varepsilon_0$ , которое должно быть равно или превышать требуемое:

$$\varepsilon_0 = \varepsilon_1 \cdot \varepsilon_2 \cdot \varepsilon_3 \cdot \varepsilon_4 = \prod_{i=1}^{i=4} \varepsilon_i; \varepsilon \geq \varepsilon_T$$

В общем случае аналогично подбирают требуемые технологические переходы в количестве  $k$ , при котором достигаемое общее уточнение  $\varepsilon_0$  больше или равно требуемому:

$$\varepsilon_0 = \varepsilon_1 \cdot \varepsilon_2 \cdot \dots \cdot \varepsilon_k = \prod_{i=1}^{i=k} \varepsilon_i, \quad (7.3)$$

$$\varepsilon \geq \varepsilon_T, \quad (7.4)$$

*Расчет наименьшего припуска  $Z_{\min}$ .* Наименьший припуск  $Z_{\min}$  на обрабатываемую поверхность должен быть достаточным для устранения погрешности обработки и дефектов поверхностного слоя, полученных на предшествующем технологическом переходе, а также погрешности установки заготовки, возникающей на данном переходе.

В соответствии с этим величина наименьшего припуска  $Z_{\min}$  складывается из пяти составляющих [5], каждая из которых определяет рассчитываемую толщину слоя материала, необходимую для компенсации имеющихся на заготовке отклонений:

$$Z_{\min} = R_z + h + \Phi + \Pi + \Upsilon, \quad (7.5)$$

где  $R_z$  – высота микронеровностей поверхности заготовки, полученных на предшествующем переходе;

$h$  – глубина дефектного поверхностного слоя заготовки, полученного на предшествующем переходе (прижоги, неметаллические включения, рыхлости, раковины);

$\Phi$  – погрешность геометрической формы поверхности заготовки, полученная на предшествующем переходе;

$\Pi$  – погрешность относительного поворота поверхности заготовки, полученная на предшествующем переходе;

$У$  – погрешность установки заготовки, возникающая на данном переходе.

В справочниках технолога [25] составляющие  $\Phi$  и  $\Pi$  в большинстве случаев определяются одной величиной  $\Delta_{\Sigma} = \Phi + \Pi$  как суммарное отклонение расположения обрабатываемой поверхности. А погрешность установки  $У$  определяется как векторная величина  $\xi$ .

В соответствии с этим наименьший припуск для обработки поверхностей вычисляют:

– для плоских поверхностей (односторонний припуск)

$$Z_{\min} = (R_z + h) + \Delta_{\Sigma} + \xi; \quad (7.6)$$

– для плоских поверхностей (двусторонний симметричный припуск)

$$2Z_{\min} = 2 \cdot [(R_z + h) + \Delta_{\Sigma} + \xi]; \quad (7.7)$$

– для наружных и внутренних цилиндрических поверхностей (двусторонний симметричный припуск)

$$2 \cdot Z_{\min} = 2 \cdot \left[ (R_z + h) + \sqrt{\Delta_{\Sigma}^2 + \xi^2} \right], \quad (7.8)$$

где составляющие  $\Delta_{\Sigma}$  и  $\xi$  суммируют квадратично;

При этом погрешность установки  $\xi$  вычисляют по формуле:

$$\xi = \sqrt{\xi_{\sigma}^2 + \xi_3^2 + 2\xi_{\sigma} \xi_3 \cdot \cos \xi_{\sigma} \cdot \xi_3}, \quad (7.9)$$

где  $\xi_{\sigma}$  – погрешность базирования, обусловленная геометрическими отклонениями базовых поверхностей;

$\xi_3$  – погрешность закрепления, порождаемая отклонениями, возникающими при закреплении (упругие и контактные деформации, сдвиги и др.).

Если угол между векторами  $\xi_{\sigma}$ ,  $\xi_3$  неизвестен, то принимают:

$$2\xi_{\sigma}\xi_3 \cdot \cos \xi_{\sigma} \cdot \xi_3 = 0. \quad (7.10)$$

При установке валов в центрах погрешность базирования принимают как четверть от допуска  $T_{\text{заг}}$  на диаметральный размер устанавливаемой заготовки [25].

$$\varepsilon_{\sigma} = 0,25T_{\text{заг}}. \quad (7.11)$$

А погрешность закрепления для жестких валов принимается  $\xi_3 = 0$ .

Отклонения расположения поверхностей находят по таблицам или рассчитывают по формуле:

$$\Delta_{\Sigma} = \Delta_{\text{уд}} \cdot L, \quad (7.12)$$

где  $\Delta_{\text{уд}}$  – удельное коробление рассматриваемой поверхности (мкм/мм);

$L$  – длина рассматриваемой поверхности (мм).

Отклонения расположения поверхности в общем случае определяются не только ее короблением, но и другими факторами – смещениями по плоскости разъема опок, штампов, смещениями базовых центров, искривлениями оси и др. Поэтому суммарное отклонение расположения обрабатываемой поверхности находят путем алгебраического или квадратичного суммирования соответствующих отклонений  $\Delta_i$ :

$$\Delta_{\Sigma} = \sum_{i=1}^k \Delta_i \text{ или } \Delta_{\Sigma} = \sqrt{\sum_{i=1}^k \Delta_i^2}, \quad (7.13)$$

где  $k$  – количество учитываемых факторов.

Следует отметить, что заниженные припуски создают неблагоприятные условия для работы режущего инструмента по корке или окалине. Величина минимального припуска не должна быть меньше той глубины резания, при которой работа нормально заточенного режущего инструмента становится неустойчивой. Для резца минимальная толщина срезаемого слоя 20 мкм. Значения составляющих для расчета  $Z_{\min}$  приведены ниже в табл. 7.1 – 7.3.

*Расчет наибольшего припуска  $Z_{\max i}$  на данном переходе.* Знание величины наибольшего припуска необходимо для правильного расчета режимов резания. Величина наибольшего припуска (рис. 7.3) определяется как сумма:

$$Z_{\max i} = Z_{\min i} + T_i + T_{i-1}, \quad (7.14)$$

где  $Z_{\min i}$  – наименьший припуск на данном переходе;

$T_i$  – допуск на данном переходе;

$T_{i-1}$  – допуск на предшествующем переходе.

При обработке поверхностей вращения, когда имеет место удвоенный симметричный припуск, наибольший припуск на диаметр вала или отверстия составляет

$$2 \cdot Z_{\max i} = 2 \cdot Z_{\min i} + T_i + T_{i-1}. \quad (7.15)$$

Допуски на размеры  $T_i$ , обеспечиваемые при выполнении соответствующих операций, можно определить по табл. 7.2 – 7.4, зная качества точности, достигаемой при соответствующем способе обработки, и получаемый линейный размер.

*Расчет номинального припуска  $Z_{Hi}$  на данном переходе.* Номинальный припуск  $Z_{Hi}$  в общем случае представляет собой разницу номинальных значений операционных (межпереходных) размеров, устанавливаемых на предшествующей и данной операциях (рис. 7.3):

$$Z_{Hi} = A_{Hi-1} - A_{Hi}. \quad (7.16)$$

Однако на данном этапе расчета операционные размеры  $A_{ni-1}$ ,  $A_{ni}$  неизвестны, их предстоит определить на последнем этапе расчета. Поэтому номинальный припуск  $Z_{Hi}$  определяем как замыкающее звено размерной цепи, звеньями которой является наименьший припуск на данной операции (переходе)  $Z_{\min i}$ , верхнее отклонение получаемого размера  $\Delta_i^B$  на данной операции и нижнее отклонение размера  $\Delta_{i-1}^H$  на предшествующей операции (см. рис. 7.3):

$$Z_{Hi} = f(Z_{\min i}; \Delta_i^B; \Delta_{i-1}^H).$$

При симметричном расположении допусков  $T_i$  и  $T_{i-1}$  относительно номинальных операционных размеров, когда предельные отклонения являются увеличивающими звеньями, имеем:

$$- \text{ для плоских поверхностей } Z_{Hi} = Z_{\min i} + \Delta_i^B + \Delta_{i-1}^H; \quad (7.17)$$

$$- \text{ для цилиндрических поверхностей } 2Z_{Hi} = 2Z_{\min i} + \Delta_i^B + \Delta_{i-1}^H. \quad (7.18)$$

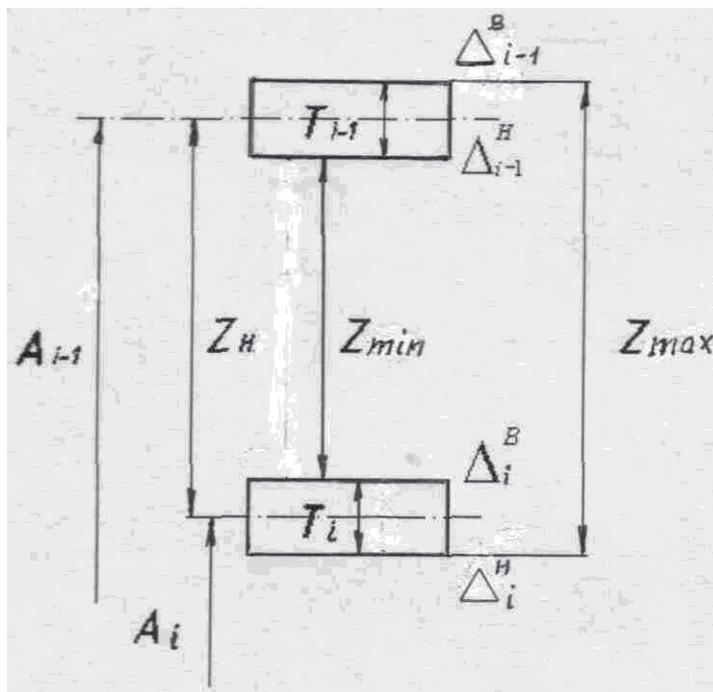


Рис.7.3. Схема к расчету наибольшего и номинального припуска

В случае несимметричного расположения допусков  $T_i$  и  $T_{i-1}$  относительно номинальных размеров предельные отклонения  $\Delta_{i-1}^H$ ,  $\Delta_i^B$  в уравнениях цепей (7.17), (7.18) могут быть представлены как уменьшающие звенья со знаком минус.

Расчет операционных размеров и размера заготовки выполняют, начиная с последней финишной операции путем прибавления к номинальному

размеру детали  $A_{\text{дет}}$  рассчитанных номинальных припусков  $Z_{Hk}$ ,  $Z_{H(k-1)}$ , ...  $Z_{H1}$ . В результате получают операционные размеры:

$$\begin{aligned}
 & - \text{ на последней операции за номером } N = k; A_k = A_{\text{дет}}; \\
 & - \text{ на предпоследней операции } N = (k - 1); A_{k-1} = A_{\text{дет}} + Z_{Hk}; \\
 & - \text{ на операции } N = (k - 2); A_{k-2} = A_{\text{дет}} + Z_{Hk} + Z_{H(k-1)}; \\
 & - \text{ на промежуточной операции } N = j; A_j = A_{\text{дет}} + \sum_{i=j-1}^k Z_{Hi}; \quad (7.19)
 \end{aligned}$$

– на первой операции  $N = 1$ ,  $A_1 = A_{\text{дет}} + \sum_{i=2}^k Z_{Hi}$ ;

Размер исходной заготовки  $A_{\text{заг}} = A_{\text{дет}} + \sum_{i=1}^k Z_{Hi}$ . (7.20)

Полученный номинальный размер заготовки обычно округляют в соответствии с требованиями стандарта на сортамент данной заготовки.

Допуски на полученные операционные (межпереходные) размеры устанавливают с учетом точности, достигаемой на соответствующей операции (см. табл. 7.1 – 7.4).

Для расчета диаметральных операционных (межпереходных) размеров при обработке наружных и внутренних цилиндрических поверхностей выражение (7.16) принимает вид:

– для диаметральных размеров валов

$$D_j = D_{\text{дет}} + 2 \sum_{i=j-1}^k Z_{Hi}; \quad (7.21)$$

– для диаметральных размеров отверстий

$$D_j = D_{\text{дет}} - 2 \sum_{i=j-1}^k Z_{Hi}. \quad (7.22)$$

В свою очередь, диаметральные размеры заготовок рассчитывают:

– для валов

$$D_{\text{заг}} = D_{\text{дет}} + 2 \sum_{i=1}^k Z_{Hi}; \quad (7.23)$$

– для отверстий

$$D_{\text{заг}} = D_{\text{дет}} - 2 \sum_{i=1}^k Z_{Hi}. \quad (7.24)$$

Общий припуск  $Z_{\text{об}}$ , рассчитанный на обработку заготовки с учетом выполнения всех предусмотренных технологических операций (переходов), определяется:

– для плоских поверхностей  $Z_{\text{об}} = A_{\text{заг}} - A_{\text{дет}}$ ; (7.25)

– для цилиндрических поверхностей  $2Z_{\text{об}} = D_{\text{заг}} - D_{\text{дет}}$ ; (7.26)

– наружных внутренних  $2Z_{\text{об}} = D_{\text{дет}} - D_{\text{заг}}$ . (7.27)

Ниже рассматриваются примеры использования изложенной методики для расчета припусков и операционных размеров для вала и корпуса.

## 7.2. Определение численных значений составляющих припуска

Величина наименьшего припуска  $Z_{\min}$ , назначаемого на обработку при выполнении соответствующего перехода или операции, должна позволить компенсировать имеющиеся на заготовке отклонения, обеспечив, таким образом, возможность ее уточнения до требований точности готовой детали. Наличие на заготовке наименьшего припуска означает, что размеры ее наружных поверхностей имеют наименьшие предельные значения  $A_{\text{заг}} \Rightarrow A_{\min}$ , а размеры ее внутренних обрабатываемых поверхностей, например отверстий, имеют наибольшие значения  $D_{\text{заг}} \Rightarrow D_{\max}$ .

Величина наименьшего припуска зависит от толщины дефектного поверхностного слоя, то есть от толщины корки для литых заготовок, обезуглероженного слоя для проката, глубины поверхностных неровностей, раковин, трещин и пр. Она зависит также от неизбежных производственных и технологических факторов – от способов изготовления и обработки заготовки, геометрических погрешностей оборудования, приспособлений и других технологических факторов.

Дефектным слоем считается слой металла, у которого структура, химический состав и механические свойства отличаются от аналогичных параметров основного материала. Глубина дефектного поверхностного слоя  $h$  зависит от способа изготовления заготовок и метода обработки на предшествующей операции. Например, в отливках из серого чугуна дефектный поверхностный слой представляет собой перлитную корку, которую удаляют для сохранения режущих свойств инструмента при последующей обработке подкоркового слоя.

Поверхностный слой проката характеризуется обезуглероженной зоной, снижающей предел прочности металла. Удаление этого слоя повышает прочностные свойства обрабатываемой заготовки. Наряду с этим при обработке заготовок из проката в поверхностном слое возникает наклеп, постепенно уменьшающийся по мере удаления от поверхности.

При обработке целесообразно удалять зону резко выраженной деформации, то есть верхнюю часть наклепанного слоя, в которой обычно наблюдается изменение структуры металла.

Микронеровности при расчете припусков учитывают посредством величины неровностей профиля заготовки  $R_z$ , удаление которых позволяет на каждой последующей технологической операции обеспечить достижение более высоких требований шероховатости поверхности.

Производственные погрешности на выполняемых операциях ха-

рактируются геометрическими отклонениями формы, отклонениями размеров и относительного положения поверхностей, а также поверхностными микронеровностями и глубиной дефекта поверхностного слоя. Геометрические погрешности формы (отклонения от прямолинейности и плоскостности, овальность, огранка, конусообразность, выпуклость, изогнутость и др.) должны находиться в пределах поля допуска на размер, который должен перекрывать предельные погрешности геометрической формы.

Суммарные отклонения расположения взаимосвязанных поверхностей  $\Delta_{\Sigma}$  (отклонения от параллельности и перпендикулярности плоских поверхностей и осей отверстий, эксцентриситет отверстий их увод и др.) также необходимо учитывать при расчете припуска, так как они непосредственно влияют на отклонения размера обрабатываемой поверхности.

Наряду с перечисленными отклонениями в процессе обработки возникают погрешности установки  $\xi$ , которые также должны быть компенсированы соответствующим увеличением припуска.

Таким образом, рассмотренные составляющие, учитываемые при расчете припусков, определяются параметрами точности выбираемых заготовок и параметрами точности деталей, которых достигают при выполнении соответствующих технологических операций. Значения параметров точности заготовок, получаемых литьем и обработкой давлением, приведены в табл. 7.1.

Таблица 7.1

Параметры точности заготовок

Способы получения заготовок	Шероховатость поверхности $Rz$ , мкм	Глубина дефектного слоя $h$ , мкм	Квалитет допуска размера $IT$	Степень точности формы
Литье в землю: ручная формовка; машинная формовка;	500 – 100	600 – 200	17 – 16	16 – 15
	300 – 80	400 – 150	16 – 15	15 – 14
Литье: в кокиль; под давлением; центробежно; в оболочковые формы; по выплавляемым моделям	200 – 100	300 – 100	16 – 14	14 – 13
	40 – 10	150 – 80	14 – 10	13 – 11
	100 – 40	200 – 100	15 – 13	14 – 12
	80 – 20	250 – 150	15 – 12	14 – 11
	40 – 10	150 – 80	13 – 10	12 – 11

Окончание табл 7.1

Способы получения заготовок	Шероховатость поверхности $Rz$ , мкм	Глубина дефектного слоя $h$ , мкм	Квалитет допуска размера $IT$	Степень точности формы
Свободная ковка	500 – 300	600 – 400	17 – 16	15 – 14
Штамповка: обычная; повышенной точности	250 – 100	400 – 200	14 – 11	14 – 13
	200 – 80	300 – 150	11 – 9	13 – 11
Прокат: горячекатаный обычной точности; повышенной точности; калиброванный (холоднотянутый)	150 – 80	150 – 100	13 – 12	13 – 12
	100 – 50	150 – 80	12 – 10	12 – 11
	80 – 40	100 – 50	11 – 9	11 – 10
Рубка на прессах и ножницах	300 – 100	150 – 100	16 – 14	15 – 14
Разрезание пилами	160 – 80	150 – 100	17 – 15	14 – 13

В табл. 7.2 приведены параметры геометрической точности и качества поверхностей, получаемых при обработке цилиндрических поверхностей.

Таблица 7.2

## Точность обработки цилиндрических поверхностей

Способ обработки	Шероховатость поверхности $Ra$ , мкм	Глубина дефектного слоя $h$ , мкм	Квалитет допуска размера $IT$	Степень точности формы
Обработка наружных цилиндрических поверхностей				
Точение: черновое; получистовое; чистовое; тонкое;	50 – 6,3	120 – 60	14 – 12	13 – 11
	25 – 1,6	50 – 20	13 – 11	12 – 10
	6,3 – 4	30 – 20	10 – 8	11 – 7
	1,6 – 0,2	10 – 5	8 – 6	7 – 4
Шлифование: предварительное; чистовое; тонкое;	6,3 – 0,4	20	9 – 8	8 – 6
	3,2 – 0,2	15 – 5	7 – 6	6 – 4
	1,6 – 0,1	5	6 – 5	5 – 2

Окончание табл. 7.2

Способ обработки	Шероховатость поверхности $Ra$ , мкм	Глубина дефектного слоя $h$ , мкм	Квалитет допуска размера $IT$	Степень точности формы
Притирка, суперфиниширование	0,8 – 0,1	5 – 3	5 – 4	4 – 2
				3 – 1
Алмазное выглаживание	0,8 – 0,2	–	6 – 5	3 – 2
Обработка отверстий				
Сверление и рассверливание	25 – 0,8	70 – 15	13 – 9	12 – 6
Зенкерование: однократное; повторное	25 – 6,3	50 – 20	13 – 10	12 – 9
	12,5 – 0,4	30 – 20	10 – 8	11 – 5
Развертывание: предварительное; чистовое; тонкое	12,5 – 0,8	25 – 15	11 – 10	10 – 7
	6,3 – 0,4	15 – 5	9 – 7	8 – 4
	3,2 – 0,1	10 – 5	6 – 5	5 – 2
протягивание: однократное; чистовое	12,5 – 0,8	25 – 10	11 – 10	10 – 7
	6,3 – 0,2	10 – 0,5	9 – 6	8 – 3
Растачивание: черновое; чистовое; тонкое	25 – 1,6	50 – 20	13 – 11	10 – 8
	6,3 – 0,4	25 – 10	10 – 8	9 – 5
	3,2 – 1,6	10 – 5	7 – 5	6 – 2
Шлифование: предварительное; чистовое; тонкое	6,3 – 0,4	25 – 10	9 – 8	8 – 5
	3,2 – 0,2	20 – 5	7 – 6	6 – 3
	1,6 – 0,1	10 – 5	6 – 5	4 – 2
Хонингование, притирка	1,6 – 0,1	5 – 3	7 – 5	3 – 1 4 – 2
Раскатывание, калибрование, алмазное выглаживание	6,3 – 0,1	–	10 – 9	9 – 7
			8 – 7	8 – 5
			6 – 5	7 – 2

Параметры геометрической точности деталей и качества поверхностей, получаемых при механической обработке плоских поверхностей, приведены в табл. 7.3.

Таблица 7.3

## Точность обработки плоских поверхностей

Метод обработки	Шероховатость поверхности $Ra$ , мкм	Глубина дефектного слоя $h$ , мкм	Квалитет допуска размера $IT$	Степень точности формы
Фрезерование:				
черновое;	12,5 – 6,3	100 – 50	14 – 12	12 – 9
чистовое;	6,3 – 3,2	60 – 20	11 – 8	8 – 6
тонкое	1,6 – 0,8	30 – 10	8 – 7	5 – 4
Строгание:				
черновое;	25 – 12,5	150 – 80	14 – 12	11 – 9
чистовое;	6,3 – 3,2	80 – 30	12 – 10	8 – 6
тонкое	1,6 – 0,8	30 – 20	9 – 8	6 – 5
Точение торцевое:				
черновое;	12,5 – 6,3	100 – 50	14 – 11	10 – 9
чистовое;	6,3 – 3,2	60 – 30	11 – 8	8 – 7
тонкое	1,6 – 0,8	30 – 10	8 – 7	6 – 5
Шлифование:				
предварительное;	6,3 – 0,4	20	9 – 8	8 – 7
чистовое;	3,2 – 0,8	15 – 5	7 – 6	6 – 5
тонкое	0,4 – 0,1	5	6 – 5	4 – 3
Протягивание:				
однократное;	3,2 – 1,6	50 – 10	9 – 8	10 – 7
чистовое	0,8 – 0,2	5 – 3	8 – 7	7
Притирка, шабрение	3,2 – 0,1	5 – 3	7 – 5	2 – 1
Полирование	0,2 – 0,05	3 – 2	6 – 5	3 – 2

Численные значения допусков на размеры заготовок, на межпереходные и операционные размеры до 500 мм, квалитеты которых приведены в табл. 7.1 – 7.3, можно получить из табл. 7.4 или определить по известной формуле [21]

$$IT = 0,45 \cdot \sqrt[3]{D_{и}} + 0,001D_{и},$$

где  $D_{и}$  – среднее значение размеров в рассматриваемом интервале.

Для размеров свыше 500 до 10000 мм значения допусков можно рассчитать по формуле

$$IT = 0,004D_{и} + 2,1.$$

Значения допусков на отклонения формы также находят по таблицам [8].

Таблица 7.4

## Значения допусков для размеров до 500 мм

Интервал размеров, мм	Квалитет												
	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
	Допуск $IT$ , мкм												
До 3	3	4	6	10	14	25	40	60	100	140	250	400	600
Св. 3 до 6	4	5	8	12	18	30	48	75	120	180	300	480	750
Св. 6 до 10	4	6	9	15	22	36	58	90	150	220	360	580	900
Св. 10 до 18	5	8	11	18	27	43	70	110	180	270	430	700	1100
Св. 18 до 30	6	9	13	21	33	52	84	130	210	330	520	840	1300
Св. 30 до 50	7	11	16	25	39	62	100	160	250	390	620	1000	1600
Св. 50 до 80	8	13	19	30	46	74	120	190	300	460	740	1200	1900
Св. 80 до 120	10	15	22	35	54	87	140	220	350	540	870	1400	2200
Св. 120 до 180	12	18	25	40	63	100	160	250	400	630	1000	1600	2500
Св. 180 до 250	14	20	29	46	72	115	185	290	460	720	1150	1850	2900
Св. 250 до 315	16	23	32	52	81	130	210	320	520	810	1300	2100	3200
Св. 315 до 400	18	25	36	57	89	140	230	360	570	890	1400	2300	3600
Св. 400 до 500	20	27	40	63	97	155	250	400	630	970	1550	2500	4000

Для расчетов отклонения расположения  $\Delta_{\Sigma}$  обрабатываемых поверхностей с использованием удельного коробления  $\Delta_{уд}$ , изогнутости и угловых отклонений могут быть использованы данные, приведенные в табл. 7.5, 7.6.

Таблица 7.5

Отклонения расположения, удельная изогнутость и коробление поверхностей заготовок  $\Delta_{уд}$ , мкм/мм

Метод получения заготовки	Диаметр или толщина заготовки, мм				
	18 – 30	30 – 50	50 – 80	80 – 120	120 – 180
Литье: в земляные формы (детали типа плит)	4	4	3	3	2,5
Литье: в металлические формы (корпусные детали)	2	2	1	1	0,7
Горячая штамповка: без правки (после правки)	2,4 (0,4)	2 (0,3)	1,6 (0,2)	1,2 (0,2)	0,8 (0,15)

Окончание табл. 7.5

Метод получения заготовки	Диаметр или толщина заготовки, мм				
	18 – 30	30 – 50	50 – 80	80 – 120	120 – 180
Прокат калиброванный нормальной точности: без правки (после правки)	4 (2)	4 (2)	3 (1,5)	3 (1,5)	2 (1)
Прокат холоднотянутый: без правки (после правки)	8 (2)	6 (1,5)	4 (1)	2 (1)	–
Закаленные детали после правки	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5
Детали после закалки ТВЧ	0,5	0,4	0,4	0,3	0,3

Таблица 7.6

Отклонения расположения, отклонения от перпендикулярности торцов заготовок относительно оси и боковых поверхностей относительно основания, мм

Способ получения заготовки	Диаметр или высота заготовки, мм				
	до 20	20 – 50	50 – 100	100 – 200	300 – 500
Литье в форму: земляную, в металлическую	1 – 1,5 0,5 – 1	1,5 – 2 0,8 – 1,2	1,5 – 2,5 1 – 1,5	2 – 3 1,5 – 2	4 – 5 2 – 4
Свободная ковка	0,5 – 1	0,8 – 1,2	1 – 1,5	1,5 – 2	2 – 4
Горячая штамповка	0,3 – 1	0,8 – 1,5	1 – 2	2,5 – 5	5 – 8
Рубка на ножницах и прессах	0,2 – 0,4	0,5 – 1,2	1 – 2,5	–	–
Резка: ножницами приводными, пилами дисковыми	0,2 – 0,3	0,4 – 0,6	0,6 – 0,8	0,8 – 1	–
	0,2 – 0,3	0,3 – 0,5	0,4 – 0,6	0,5 – 0,8	–

Для изготовления валов, зубчатых колес, фланцев, втулок и других деталей тел вращения в качестве заготовок широко применяют круглый прокат. В табл. 7.7 приведен ряд диаметральных размеров выпускаемого круглого проката и устанавливаемые на них предельные отклонения.

Таблица 7.7

Диаметральные размеры и предельные отклонения круглого проката

Диаметральные размеры, мм	Предельные отклонения диаметральных размеров круглого проката, мм					
	высокой точности		повышенной точности		обычной точности	
	<i>es</i>	<i>ei</i>	<i>es</i>	<i>ei</i>	<i>es</i>	<i>ei</i>
5; 5,5; 6; 6,3; 6,5; 7 – 9	0,1	–0,2	0,2	–0,5	0,3	–0,5

Диаметральные размеры, мм	Предельные отклонения диаметральных размеров круглого проката, мм					
	высокой точности		повышенной точности		обычной точности	
	<i>es</i>	<i>ei</i>	<i>es</i>	<i>ei</i>	<i>es</i>	<i>ei</i>
10 – 19	0,1	–0,3	0,2	–0,5	0,3	–0,5
20 – 25	0,2	–0,3	0,2	–0,5	0,4	–0,5
26 – 48	0,2	–0,5	0,2	–0,7	0,4	–0,7
50; 52 – 58	0,2	–0,8	0,2	–1,0	0,4	–1,0
60; 62; 63; 65; 67; 6870; 72; 75; 78	0,3	–0,9	0,3	–1,1	0,5	–1,1
80; 82; 85; 9095	0,3	–1,1	0,3	–1,3	0,5	–1,3
100; 105; 110; 115	–	–	0,4	–1,7	0,6	–1,7
120; 125; 130; 135; 140; 150	–	–	0,6	–2,0	0,8	–2,0
160; 170; 180; 190; 200	–	–	–	–	0,9	–2,5
210; 220; 230; 240; 250	–	–	–	–	1,2	–3,0

Пример расчета припусков для детали типа вал.

Задача: рассчитать припуски и операционные размеры для изготавливаемого вала (рис. 7.4), длина вала  $L = 350$  мм, диаметр  $D 40f7$ , шероховатость поверхности  $Ra = 0,63$  мкм. Вал работает в редукторе, обеспечивая базирование зубчатого колеса по посадке  $H7/f7$ .

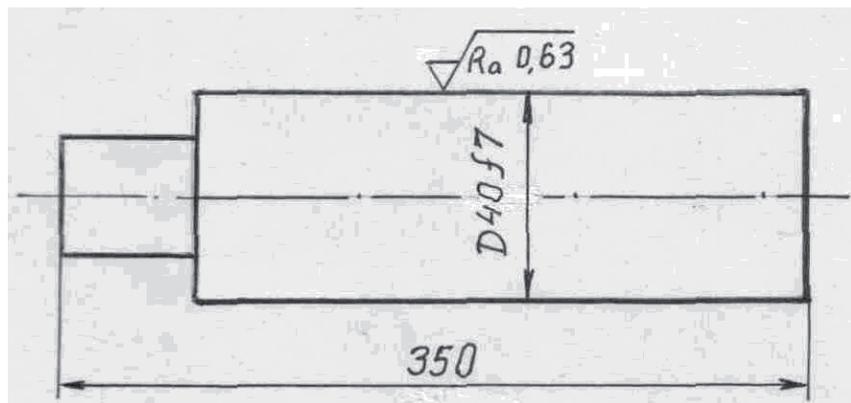


Рис. 7.4. Эскиз изготавливаемого вала

Зная номинальный диаметр вала и посадку  $D_{дет} 40f7$ , находим предельные отклонения  $es = \Delta^B = -0,025$  мм,  $ei = \Delta^H = -0,05$  мм и допуск на диаметр вала  $T_{дет}$

$$T_{дет} = -0,025 - (-0,05) = 0,025 \text{ мм.}$$

Для условий серийного производства в качестве заготовки выбираем круглый горячекатаный прокат обычной точности, для которого согласно требованиям сортамента для  $D_{\text{заг}} 48$  установлены предельные отклонения  $\Delta_{\text{заг}}^{\text{В}} = 0,4$  мм,  $\Delta_{\text{заг}}^{\text{Н}} = -0,7$  мм (см. табл. 7.6). Таким образом, допуск на размер заготовки  $T_{\text{заг}} = 0,4 - (-0,7) = 1,1$  мм.

### 1. Выявление необходимых технологических переходов

Рассчитываем требуемое уточнение:

$$\varepsilon_{\text{т}} = \frac{T_{\text{заг}}}{T_{\text{дет}}} = \frac{1,1}{0,025} = 44.$$

Требуемую точность вала  $D 40f7$ , шероховатость поверхности  $Ra = 0,63$  мкм можно получить при чистовом круглом продольном шлифовании (см. табл. 7.2). Чистовому шлифованию должно предшествовать предварительное, которое обеспечивает точность диаметральных размеров в пределах  $T_3 = 0,04$  мм,  $Ra = 1,25$  мкм;  $h = 0,02$  мм (см. табл. 7.2). Следовательно, чистовое шлифование на последней операции обеспечивает уточнение:

$$\varepsilon_4 = \frac{T_3}{T_{\text{дет}}} = \frac{0,04}{0,025} = 1,6.$$

Предварительному шлифованию должно предшествовать чистовое точение, при котором достигают:  $T_3 = 0,1$  мм,  $Ra = 4$  мкм,  $h = 0,03$  мм, (см. табл. 7.2). Отсюда следует, что

$$\varepsilon_3 = \frac{T_2}{T_3} = \frac{0,1}{0,04} = 2,5.$$

Чистовому точению, в свою очередь, предшествует черновое точение, которое может выполняться по заготовке, и согласно табл. 7.2 имеем:

$$T_3 = 0,3 \text{ мм}, Ra = 15 \text{ мкм}, h = 0,07 \text{ мм}.$$

$$\varepsilon_2 = \frac{T_1}{T_2} = \frac{0,3}{0,1} = 3.$$

Это означает, что черновое точение, выполняемое на первой операции, обеспечивает уточнение:

$$\varepsilon_1 = \frac{T_{\text{заг}}}{T_1} = 3,7.$$

Таким образом, общее уточнение, получаемое при выполнении выбранных технологических переходов, по величине равно или превышает требуемое:

$$\varepsilon_0 = \varepsilon_1 \cdot \varepsilon_2 \cdot \varepsilon_3 \cdot \varepsilon_4 = 1,6 \cdot 2,5 \cdot 3 \cdot 3,7 \geq \varepsilon = 44.$$

Следовательно, выбранные технологические переходы: 1 – черно-

вое точение, выполняемое по заготовке; 2 – чистовое точение; 3 – предварительное круглое шлифование; 4 – чистовое круглое шлифование, для которых ниже рассчитываются припуски и операционные размеры, позволяют достигнуть требуемую точность вала.

2. Расчет наименьших припусков на выбранные переходы выполняем согласно выражению (7.8), начиная с последнего перехода.

Для чистового шлифования:

$$2 \cdot Z_{\min 4} = 2 \cdot [(0,005 + 0,02) + (0,008 + 0)] = 20,033 = 0,066 \text{ мм.}$$

При расчете параметр  $R_a$  переводим в  $R_z$  согласно табл. 2.2:

$$R_z = 4 \cdot R_a = 4 \cdot 1,25 = 5 \text{ мкм} = 0,005 \text{ мм.}$$

Суммарное отклонение расположения поверхности  $\Delta_\Sigma = 0,008$  определено по табл. 7.2 как погрешность геометрической формы после предварительного шлифования. Погрешность установки  $\xi = 0$ , так как чистовое шлифование выполняется после предварительного шлифования без переустановки заготовки.

Для предварительного шлифования:

$$2 \cdot Z_{\min 3} = 2 \cdot [(0,016 + 0,03) + (0,03^2 + 0,025^2)^{0,5}] = 2 \cdot 0,085 = 0,17 \text{ мм,}$$

где параметр  $R_a$  переведен в  $R_z$ :  $R_z = 4 \cdot R_a = 4 \cdot 4 = 16 \text{ мкм} = 0,016 \text{ мм.}$

Отклонение расположения поверхности  $\Delta_\Sigma = 0,03 \text{ мм}$  определено по табл. 7.2 как погрешность геометрической формы после чистового точения. Погрешность установки заготовки  $\xi$  рассчитана по формуле (7.9), в которой погрешность базирования  $\xi_6$  определена как четверть от допуска на диаметральный размер заготовки, полученной после чистового точения:

$$\xi_6 = 0,25 \cdot T_2 = 0,25 \cdot 0,1 = 0,025 \text{ мм,}$$

а погрешность закрепления жесткой детали в центрах принята  $\xi_3 = 0$ .

Для чистового точения:

$$2 \cdot Z_{\min 2} = 2 \cdot [(0,06 + 0,07) + (0,12^2 + 0,075^2)^{0,5}] = 2 \cdot 0,27 = 0,54 \text{ мм,}$$

где  $R_z = 4 \cdot R_a = 4 \cdot 15 = 60 \text{ мкм} = 0,06 \text{ мм}$ ;  $h = 0,07 \text{ мм}$ ;

$$\Delta_\Sigma = 0,120 \text{ мм}; \xi_6 = 0,25 \cdot T_1 = 0,25 \cdot 0,3 = 0,075 \text{ мм}; \xi_3 = 0.$$

Для чернового точения:

$$2 \cdot Z_{\min 2} = 2 \cdot [(0,125 + 0,150) + (0,7^2 + 0,275^2)^{0,5}] = 2 \cdot 1,027 = 2,054 \text{ мм,}$$

где  $R_z = 125 \text{ мкм} = 0,125 \text{ мм}$ ;  $h = 0,150 \text{ мм}$ .

Отклонение расположения поверхности  $\Delta_\Sigma$  определяем по формуле (7.12) при значении  $\Delta_{уд} = 2 \text{ мкм/мм}$  (см. табл. 7.5):

$$\Delta_\Sigma = \Delta_{уд} \cdot L = 0,002 \cdot 350 = 0,7 \text{ мм.}$$

Погрешность установки находим согласно (7.9) при

$$\xi_6 = 0,25 \cdot T_{заг} = 0,25 \cdot 1,1 = 0,275 \text{ мм и } \xi_3 = 0.$$

3. Расчет наибольших припусков  $Z_{\max i}$  на предусмотренных операциях выполняем согласно (7.14):

$$2 \cdot Z_{\max 4} = 0,066 + 0,025 + 0,04 = 0,131 \text{ мм};$$

$$2 \cdot Z_{\max 3} = 0,17 + 0,04 + 0,1 = 0,31 \text{ мм};$$

$$2 \cdot Z_{\max 2} = 0,54 + 0,1 + 0,3 = 0,94 \text{ мм};$$

$$2 \cdot Z_{\max 1} = 2,054 + 0,3 + 1,1 = 3,454 \text{ мм}.$$

4. Расчет номинальных припусков  $Z_{Hi}$  выполняем согласно (7.17) с учетом расположения допусков относительно номинальных размеров. Для простоты выявления размерной цепи, в которой  $Z_{Hi}$  является замыкающим звеном, целесообразно построить схемы расположения допусков на рассматриваемых операциях (рис. 7.5).

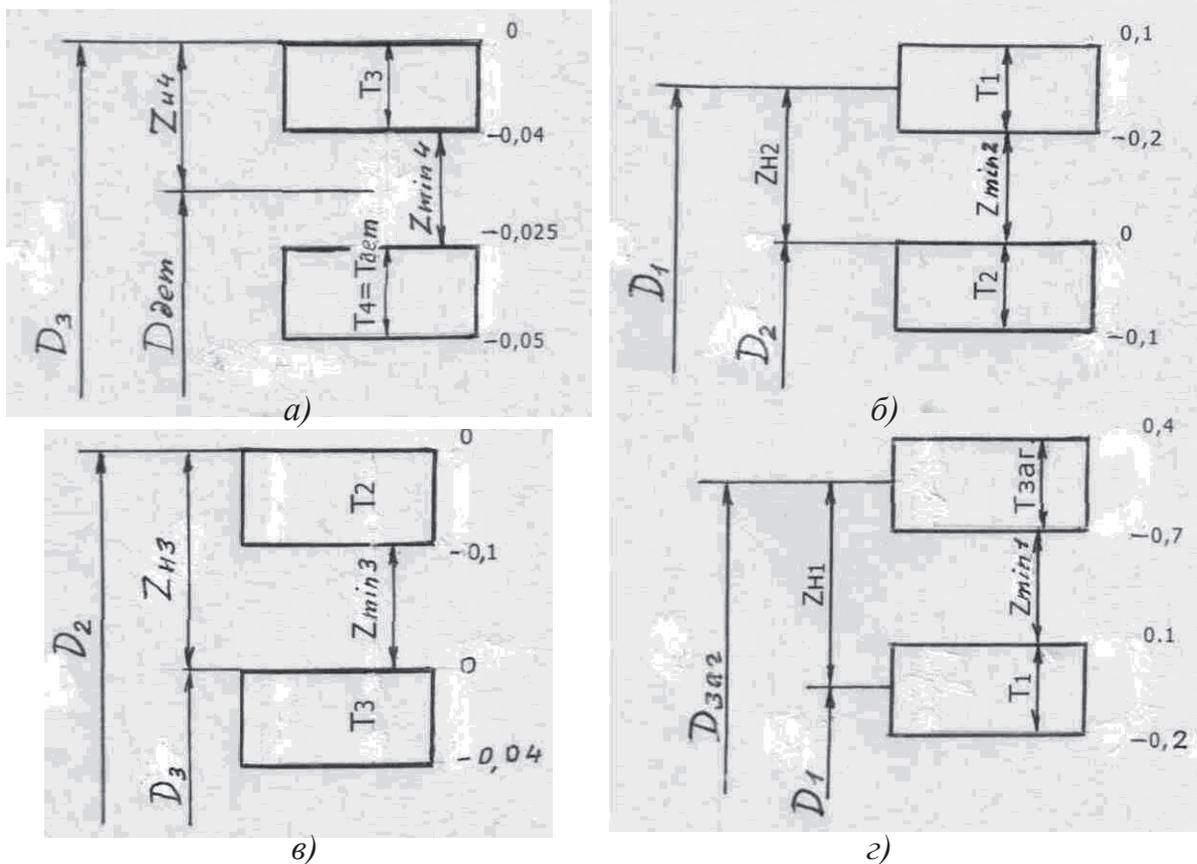


Рис. 7.5. Схемы к определению номинальных припусков на операциях изготовления вала: а – чистовое шлифование; б – предварительное шлифование; в – чистовое точение; г – черновое точение

Чистовое шлифование (рис. 7.5, а):

$$2Z_{H4} = 2\bar{Z}_{\min 4} + \bar{\Delta}_3^H - \bar{\Delta}_{дет}^B; \quad 2Z_{H4} = 0,066 + 0,04 - 0,025 = 0,081 \text{ мм}.$$

Предварительное шлифование (рис. 7.5, б):

$$2Z_{H3} = 2\bar{Z}_{\min 3} + \bar{\Delta}_2^H + \bar{\Delta}_3^B; \quad 2Z_{H3} = 0,17 + 0,1 + 0 = 0,27 \text{ мм}.$$

Чистовое точение (рис. 7.5, в):

$$2Z_{H2} = 2\bar{Z}_{\min 2} + \bar{\Delta}_1^H + \bar{\Delta}_2^B; \quad 2Z_{H2} = 0,54 + 0,2 + 0 = 0,74 \text{ мм}.$$

Черновое точение (рис. 7.5, з):

$$2Z_{H1} = 2\bar{Z}_{\min 1} + \bar{\Delta}_{\text{заг}}^H + \bar{\Delta}_1^B; \quad 2Z_{H1} = 2,054 + 0,7 + 0,1 = 2,854 \text{ мм.}$$

5. Расчет межпереходных размеров и размера заготовки выполняем по формулам (7.22), (7.23):

Чистовое шлифование:  $D_4 = D_{\text{дет}} = 40_{-0,05}^{-0,025}$

Предварительное шлифование:

$$D_3 = D_{\text{дет}} + 2Z_{H4}, \quad D_3 = 40 + 0,081 = 40,081 \cong 40,1_{-0,04}^0.$$

Чистовое точение:

$$D_2 = D_{\text{дет}} + 2Z_{H4} + 2Z_{H3}, \quad D_2 = 40 + 0,081 + 0,27 = 40,351 \cong 40,4_{-0,1}^0.$$

Черновое точение:

$$D_1 = D_{\text{дет}} + 2Z_{H4} + 2Z_{H3} + 2Z_{H2} + 2Z_{H1},$$

$$D_1 = 40 + 0,081 + 0,27 + 0,74 = 41,09 \cong 41,1_{-0,2}^{+0,1}.$$

Рассчитанные операционные размеры даны с округлением в соответствии с размерами применяемых контрольных калибров.

6. Расчет размеров заготовки вала:

$$D_{\text{заг}} = D_{\text{дет}} + 2Z_{H4} + 2Z_{H3} + 2Z_{H2} + 2Z_{H1};$$

$$D_1 = 40 + 0,081 + 0,27 + 0,74 + 2,854 = 43,94 \cong 44_{-0,7}^{+0,4}.$$

Полученный размер заготовки также округляют до ближайшего большего размера из сортамента круглого проката (см. табл. 7.7).

Таким образом, общий припуск на обработку вала составляет

$$2Z_{\text{об}} = D_{\text{заг}} - D_{\text{дет}}, \quad 2Z_{\text{об}} = 44 - 40 = 4 \text{ мм;}$$

припуск на токарную обработку вала

$$2Z_{\text{ток}} = D_{\text{заг}} - D_2 = 44 - 40,4 = 3,6 \text{ мм;}$$

припуск, оставляемый на шлифование

$$2Z_{\text{шл}} = D_2 - D_{\text{дет}} = 40,4 - 40 = 0,4 \text{ мм.}$$

Результаты расчета припусков, операционных размеров и размеров заготовки могут быть представлены в табл. 7.8.

Таблица 7.8

Результаты расчета припусков

Технологический маршрут	Элементы припуска				Расчетный припуск			Размеры, допуски и предельные отклонения на детали, на операциях и на заготовке			
	$R_z$	$h$	$\Delta_\Sigma$	$\xi$	$Z_{\min}$	$Z_{\max}$	$Z_H$	$A_i$	$T_i$	$ES(es)_i$	$EI(ei)_i$
Заготовка – штамповка											
...											
Шлифование чистовое											

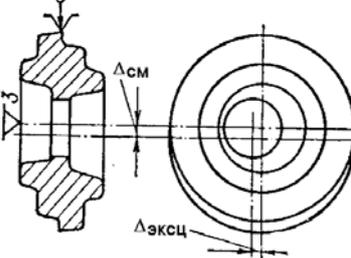
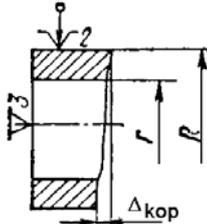
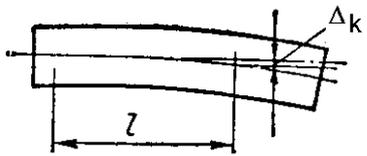
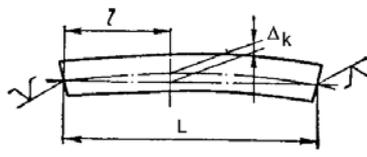
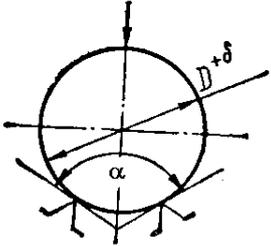
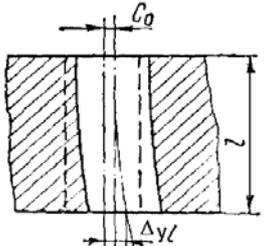
### 7. Определение отклонения расположения поверхностей

При определении отклонения расположения поверхностей  $\Delta_{\Sigma}$  для различных видов заготовок и схем базирования можно воспользоваться следующими рекомендациями (табл. 7.9).

Таблица 7.9

Отклонения расположения поверхностей  $\Delta_{\Sigma}$

Тип детали и метод базирования	Эскиз	Расчетные формулы
<b>1. Литые заготовки</b>		
Корпусные детали, по отверстиям с параллельными осями перпендикулярной к ним плоскости		$\Delta = \sqrt{\Delta_{\text{кор}}^2 + \Delta_{\text{см}}^2}$ $\Delta = \Delta_{\text{кор}} + \Delta_{\text{см}}$ $\Delta_{\text{см}} = ITd$ $\Delta_{\text{кор}} = \Delta_k L$
То же, по плоскости, противоположной обрабатываемой		$\Delta = \Delta_{\text{кор}}$
Детали – тела вращения, в самоцентрирующих патронах по наружному диаметру с прижимом к торцовой поверхности		$\Delta_d = \sqrt{\Delta_{\text{кор}}^2 + \Delta_{\text{см}}^2}$ $\Delta = \Delta_D = \Delta_k D$ $\Delta_{\text{см}} = ITd$ $\Delta_B = \Delta_k B$
<b>2. Штампованные заготовки</b>		
Валы ступенчатые, рычаги и т.п. с базированием по крайней ступени (поверхности)		$\Delta = \sqrt{\Delta_{\text{кор}}^2 + \Delta_{\text{см}}^2}$ $\Delta_{\text{кор}} = \Delta_k L$
То же при обработке в центрах		$\Delta = \sqrt{\Delta_{\text{кор}}^2 + \Delta_{\text{см}}^2 + \Delta_{\text{ц}}^2}$ $\Delta_{\text{кор}} = \Delta_k L$ $l \leq 0,5L$

Тип детали и метод базирования	Эскиз	Расчетные формулы
Детали типа дисков с прошиваемым центральным отверстием (шестерни, диски и т.п.) с установкой по наружному диаметру и торцу		$\Delta = \sqrt{\Delta_{\text{см}}^2 + \Delta_{\text{эк с}}^2}$
<b>3. Заготовки из сортового проката</b>		
То же, при обработке торцовых поверхностей		$\Delta = \Delta_{\text{к}} \text{кор}$ $\Delta_{\text{к}} \text{кор} = \Delta_{\text{к}} D = \Delta_{\text{к}} 2R$
При консольном закреплении в самоцентрирующих патронах		$\Delta_{\text{к}} \text{кор} = \Delta_{\text{к}} L$
При обработке в центрах		$\Delta = \sqrt{\Delta_{\text{к}}^2 + \Delta_{\text{ц}}^2}$ $\Delta_{\text{к}} \text{кор} = \Delta_{\text{к}} l$ $l \leq 0,5L$
<b>4. Зацентровка и сверление заготовок</b>		
При установке в самоцентрирующих зажимных устройствах		$\Delta_{\text{ц}} = 0,25(ITD^2 + 1)^2$
При установке на призмах с односторонним прижимом		$\Delta_{\text{ц}} = (ITD^2/2 + 0,25^2)^{0,5}$ <p style="text-align: center;">при <math>\alpha = 90^\circ</math></p> $D_{\text{ц}} = (ITD^2/3 + 0,25^2)^{0,5}$ <p style="text-align: center;">при <math>\alpha = 120^\circ</math></p>
Детали всех типов, при обработке отверстий в неподвижной детали		$\Delta = ((\Delta_y l)^2 + C_o^2)^{0,5}$

Наличие термообработки в процессе изготовления детали вносит дополнительные отклонения расположения (коробления), которые могут быть определены по формуле

$$\Delta_{\text{терм}} = 0,001 \cdot n_k \cdot L / (0,1d + 0,3) \text{ мм}, \quad (7.28)$$

где  $n_k$  – коэффициент, зависящий от вида термической обработки;

$L$  и  $d$  – соответственно длина и диаметр отверстия в заготовке.

При объемной закалке  $n_k = 1$ , при закалке ТВЧ  $n_k = 0,5$ .

Отклонения расположения поверхности, полученные в результате термической обработки, складываются с отклонениями, оставшимися после выполнения предшествующего перехода. Остаточные отклонения после механической обработки определяют расчетом или по эмпирическим формулам.

При обработке торцовых поверхностей штампованных заготовок с центральным отверстием остаточную величину отклонений геометрической формы (коробления) можно определить:

после черновой обработки  $\Delta_{\text{ост}} = 1,2[0,06\Delta_{\text{кор}} + 0,15(R - r)];$

после получистовой обработки  $\Delta_{\text{ост}} = 1,1[0,003\Delta_{\text{кор}} + 0,1(R - r)];$

после чистовой обработки  $\Delta_{\text{ост}} = 0,003\Delta_{\text{кор}} + 0,1(R - r),$

где  $R$  и  $r$  – радиусы наружной поверхности и отверстия (см. табл. 7.9).

### 7.3. Определение погрешности установки заготовок на станках

Процесс установки при обработке заготовок включает базирование и закрепление. При базировании заготовке придают определенное положение, неизменность которого в процессе обработки обеспечивают за счет закрепления. Вследствие наличия геометрических отклонений базовых поверхностей заготовок, погрешности изготовления и износа опорных элементов приспособления, а также в результате неустойчивости усилий закрепления имеют место отклонения в положении заготовки на станке и в приспособлении.

Погрешность установки заготовки в приспособлениях  $\xi_y$  вычисляют с учетом погрешностей: базирования  $\xi_b$ , закрепления  $\xi_z$  заготовок, а также с учетом изготовления и износа опорных элементов приспособлений  $\xi_{\text{пр}}$ . Погрешность установки определяют как предельное поле рассеивания положений измерительной поверхности относительно поверхности отсчета в направлении выдерживаемого размера. Так как указанные выше погрешности являются случайными величинами, то наиболее вероятное значение погрешности установки можно определить по формуле

$$\xi_y = (\xi_b^2 + \xi_z^2 + \xi_{\text{пр}}^2)^{0,5}, \quad (7.29)$$

Для типовых деталей при использовании универсальной техноло-

гической оснастки погрешность установки можно определять по таблицам, приводимым в справочниках [25, 22] (табл. 7.10).

Таблица 7.10

Погрешность установки заготовок в патронах  
и на оправках без выверки

Тип патрона или оправки	Квалитет базы заготовки	Погрешности установки, мкм, для направления	
		радиального	осевого
1	2	3	4
Цанговые оправки при диаметре установочной поверхности, мм: до 50; св. 50 до 200	7 – 9	10 – 35 20 – 60	20 50
Трехкулачковые патроны с незакаленными кулачками или разрезными втулками при диаметре до 120 мм	При зазоре до закрепления погрешность 0,02 – 0,10 мм	10 – 30	10 – 120
Двухкулачковые патроны при диаметре детали 200 мм: с винтами; с рейками	11 – 13	100 – 200 20 – 60	50 – 100 15 – 40
Цилиндрические оправки с гайками (установка на оправку с зазором)	8 – 11	В пределах допуска на зазор	10
Конусные оправки при отверстии длиной менее $1,5d$	7	30	Определяют размеры деталей и оправок
Патроны и оправки с упругими втулками и гидропластмассой при $l$ : до $0,5d$ ; св. $3,0d$	7 – 9	3 – 10 10 – 20	– –
Патроны и оправки с пластинчатыми (тарельчатыми) пружинами	7 – 11	10 – 20	–
Патроны и оправки с упругими втулками и роликами, опирающимися на тела, имеющие форму гиперboloида вращения	7 – 8	3 – 8	–
Мембранные патроны; патроны и оправки с упругими элементами гофрированного типа	7 – 9 5 – 7	3 – 5 2 – 5	– –
Применение пневматических и гидравлических силовых узлов позволяет уменьшить погрешность установки на 20 – 40 %			

Таблица 7.11

## Погрешность установки заготовок размером до 60 мм в тисках

Тиски	Метод установки	Смещение заготовок, мкм
Винтовые	На подкладке в свободном состоянии	100 – 200
Винтовые	На подкладке с постукиванием при зажиме	50 – 80
Эксцентриковые	С подкладкой	40 – 100
	Без подкладки	30 – 50

При соблюдении постоянства силы зажима погрешность снижается на 30 – 40 %

В процессе установки заготовок для обработки с выверкой возникает погрешность установки  $\xi_{ув}$  из-за неточности выверки по разметочным рискам или непосредственно по поверхностям заготовок. Погрешность  $\xi_{ув}$  может охватывать и погрешность закрепления. В табл. 7.12, 7.13 эта погрешность дана как одна величина.

Таблица 7.12

## Погрешность установки заготовок на станках с выверкой по цилиндрической поверхности (мкм)

Способ установки	Метод выверки	Погрешность установки
На центрах и регулируемых крестовинах	С двух концов в вертикальной и горизонтальной плоскостях и на биение	Мелких <u>0,50 – 1,00</u>
В четырехкулачковом патроне и неподвижном люнете	Со стороны патрона по высоте и на биение	<u>0,02 – 0,04</u>
В четырехкулачковом патроне и неподвижном люнете	С двух концов в двух плоскостях и на биение	Средних <u>1,00 – 1,50</u> 0,03 – 0,06
В четырехкулачковом патроне	По наружному или внутреннему диаметру и торцу	Крупных <u>2,00 – 3,00</u> 0,05 – 0,08
На угольнике, по разметке	По диаметру и торцу	

Погрешности, указанные в числителе, относятся к выверке иглой по необработанной (большие значения) или грубо обработанной (меньшие значения) поверхности. В знаменателе приведены погрешности выверки с помощью индикатора по поверхности, обработанной чистовым точением

Таблица 7.13

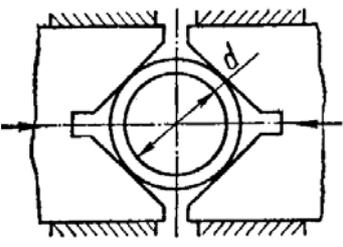
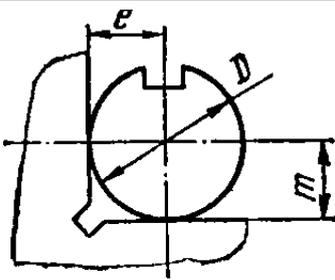
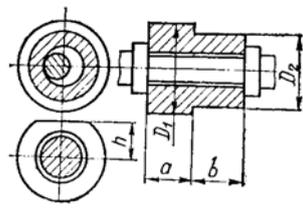
Погрешность установки заготовок на станках с выверкой  
по плоской поверхности (мкм)

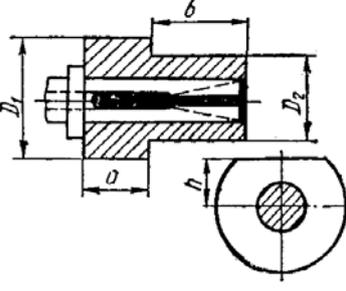
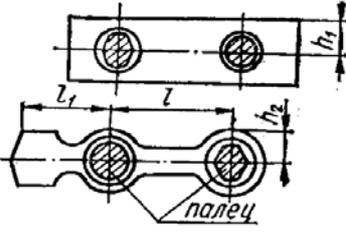
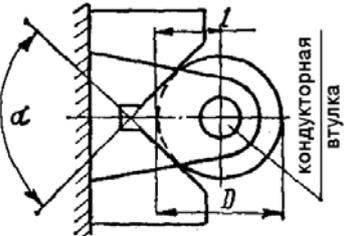
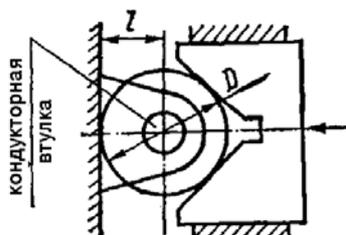
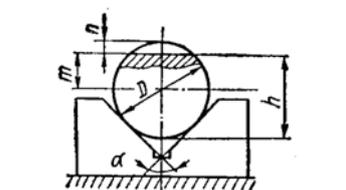
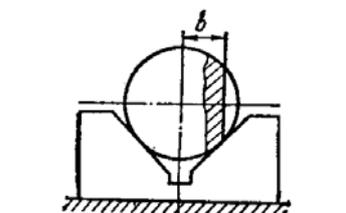
Метод выверки	Наибольший размер поверхности, м			
	До 1	Св. 1 до 3	Св. 3 до 6	Св. 6
По разметке иглой	0,5	1	2	3
По предварительно обработанной поверхности индикатором	0,15	0,2	0,4	0,6
По чисто обработанной поверхности индикатором	0,05	0,08	0,10	0,15

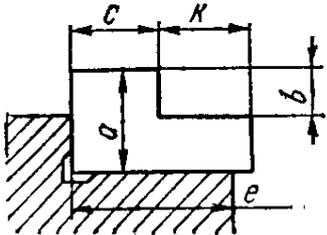
Данные о погрешности установки заготовок приведены также в табл. 7.14.

Таблица 7.14

Погрешность установки заготовок (мкм)

Базирование	Схема установки	Погрешность базирования $\varepsilon$ для размера
В самоцентрирующих призмах		$\varepsilon_d = 0$
То же		$\varepsilon_e = ITD/2; \varepsilon_m = 0$
По отверстию: на жесткой оправке с посадкой с зазором		$\varepsilon_{D1} = S_{\min} + ITB + ITA;$ $\varepsilon_{D2} = S_{\min} + ITB + ITA;$ $\varepsilon_h = S_{\min} + ITB + ITA.$ При установке оправки на плавающий передний центр, в гильзу или патрон по упору: $\varepsilon_a = 0; \varepsilon_b = 0$

Базирование	Схема установки	Погрешность базирования $\varepsilon$ для размера
<p>На разжимной оправке: на жесткой оправке с натягом</p>		<p><math>\varepsilon_{D1}=0; \varepsilon_{D2}=0;</math> <math>\varepsilon_h=0; \varepsilon_a=0; \varepsilon_b=IT_A;</math> При установке оправки на жесткий передний центр <math>\varepsilon_a=\Delta_{ц}; \varepsilon_b=0</math></p>
<p>По двум отверстиям на пальцах: при обработке верхней поверхности</p>		<p><math>\varepsilon_{h1}=S_{\min}+ITB+IT_A;</math> <math>\varepsilon_{h2}=(S_{\min}+ITB+IT_A) \times (2l_1+1)/l</math></p>
<p>В призме при обработке отверстий по кондуктору</p>		<p><math>\varepsilon_1=ITD/(2\sin\alpha/2)</math></p>
<p>На плоской поверхности при обработке отверстия по кондуктору</p>		<p><math>\varepsilon_1=ITD/2</math></p>
<p>В призме при обработке плоскости или паза</p>		<p><math>\varepsilon_h=ITD(1/\sin\alpha/2-1)/2;</math> <math>\varepsilon_n=ITD(1/\sin\alpha/2+1)/2;</math> <math>\varepsilon_h=ITD/(2\sin\alpha/2)</math></p>
<p>В призме при обработке плоскости или паза</p>		<p><math>\varepsilon_b=0</math></p>

Базирование	Схема установки	Погрешность базирования $\epsilon$ для размера			
По плоскости: при обработке уступа		$\epsilon_b = ITA;$ $\epsilon_k = ITE;$ $\epsilon_c = 0$			
В таблице приняты следующие обозначения: $\epsilon_c$ – смещение оси отверстия относительно внешней поверхности; ITD – допуск на диаметр внешней поверхности; $s_{\min}$ – минимальный гарантированный зазор; ITA – допуск на размер базового отверстия; ITB – допуск на размер оправки; $\epsilon_{\text{ц}}$ – просадка центров. Значения $\epsilon_{\text{ц}}$ принимать следующие:					
Наибольший диаметр центрального отверстия, мм	1; 2; 2,5	4; 5; 6	7,5; 10	12,5; 15	20; 30
Просадка центров, $\epsilon_{\text{ц}}$ , мм	0,11	0,14	0,18	0,21	0,25

Ниже рассматривается еще один пример определения припусков расчетно-аналитическим методом для детали типа «вал», подвергаемой закалке, для которой в качестве заготовки выбрана объемная штамповка.

*Пример.* Задача – рассчитать припуск на обработку цилиндрической поверхности вала  $\varnothing 80f7$  (рис. 7.6, поверхность 2). Неуказанная шероховатость  $Ra = 12,5$ .

Заготовку получают методом горячей объемной штамповки на горизонтально-ковочной машине (ГКМ) за два перехода. Нагрев заготовки – пламенный. Материал детали – сталь 45 (0,42 – 0,5 % С; 0,17 – 0,37 % Si; 0,50 – 0,80 % Mn; не более 0,25 % Cr). Масса детали 10,8 кг, твердость 41...45 HRC<sub>3</sub>.

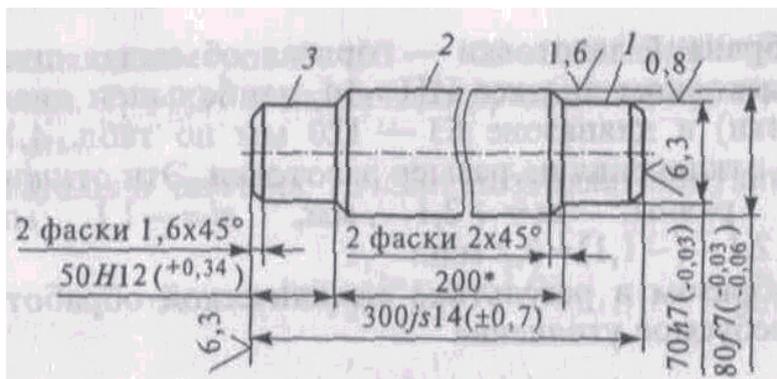


Рис. 7.6. Эскиз вала, подвергаемого термообработке

Состав и назначение технических требований для заготовок штамповок показано во второй части данного учебника (§ 8.4) Для данной заготовки имеем:

1. Масса поковки (расчетная)  $= 10,8 \cdot K_p = 10,8 \cdot 1,3 = 14,04$  кг ( $NI = 7$ , табл. 8.5), расчетный коэффициент  $K_p = 1,3$  [22]. Подробнее об интервале массы поковки будет сказано во второй части данного учебника (табл. 8.5).

2. Класс точности – Т4, ( $KT = 4$ ). Более подробные данные о классе точности поковок приведены во второй части данного учебника (табл. 8.3).

3. Группа стали М2 ( $MS = 2$ ). Средняя массовая доля углерода в стали  $(0,42 + 0,50) / 2 = 0,46$  % С; суммарная массовая доля легирующих элементов – 1,17 %).

4. Степень сложности – С1 ( $ST = 1$ ), об этом более подробно говорится во второй части данного учебника (табл. 8.4).

5. Описываемая фигура – цилиндр. Диаметр  $80 \cdot 1,05 = 85,17$  мм = 8,517 см; высота –  $300 \cdot 1,05 = 314$  мм = 31,5 см. Масса описываемой фигуры  $3,14 \cdot (8,517/2)^2 \cdot 31,5 \cdot 7,85/1000 = 14,081$  кг.

$$G_n/G_f = 14,04/14,87 = 0,997.$$

6. Конфигурация поверхности разъема штампа – П (плоская).

7. Исходный индекс  $ИН = 14$  находим согласно (8.1) которая находится во второй части данного учебника:

$$\begin{aligned} \text{ИН} &= NI + (MS - 1) + (ST - 1) + 2(KT - 1) = \\ &= 7 + (2 - 1) + (1 - 1) + 2(4 - 1) = 14. \end{aligned}$$

*1. Определение требуемых технологических переходов путем расчета коэффициентов уточнения*

В результате обработки требуется обеспечить точность диаметрального размера детали  $D_{\text{дет}} = 80f7$ , предельные отклонения  $es = -0,03$ ;  $ei = -0,06$ , допуск  $T_{\text{дет}} = es - ei = -0,03 - (-0,06) = 0,03$  мм,  $Ra$  0,8.

Для выбранной заготовки (горячая объемная штамповка на ГKM) при исходном индексе  $ИН = 14$ , наибольшем диаметре (толщине поковки) в диапазоне 63 – 120 мм по таблицам [22] находим предельные отклонения на размер заготовки:  $es = +2,1$  мм,  $ei = -1,1$  мм. Тогда  $T_{\text{заг}} = es - ei = 2,1 - (-1,1) = 3,2$  мм. Таким образом, в результате выполнения механической обработки следует получить требуемое уточнение

$$\epsilon_m = \frac{T_{\text{заг}}}{T_{\text{дет}}} = \frac{3,2}{0,03} = 106,7.$$

Необходимую точность размера  $D_d = 80f7$  и шероховатость поверхности  $Ra$  0,8 достигают чистовым круглым шлифованием (см. табл. 7.2), которому должно предшествовать предварительное шлифование.

На предварительном шлифовании достигают точность размера по  $IT8$ , шероховатость поверхности  $Rz\ 10$ ,  $h = 20\ \text{мкм} = 0,02\ \text{мм}$  (см. табл. 7.2).

Для диапазона размеров  $D = 80 \div 120\ \text{мм}$  находим по табл. 7.4 допуск на операцию предварительного шлифования  $T_3 = 0,054$  и назначаем предельные отклонения  $es_3 = 0$ ;  $ei_3 = -0,054\ \text{мм}$ .

Таким образом, чистовое шлифование обеспечивает уточнение

$$\varepsilon_4 = \frac{T_3}{T_{\text{дет}}} = \frac{0,054}{0,03} = 1,8.$$

Предварительному шлифованию предшествует термообработка – объемная закалка, которая обеспечивает требуемую твердость поверхности  $41...45\ \text{HRC}_3$ . На термообработку заготовка поступает после чистового точения, в результате которого достигают точность диаметрального размера  $IT11$ , шероховатость поверхности  $Ra\ 6,3$  и  $h = 30\ \text{мкм}$  (см. табл. 7.2). Согласно табл. 7.4 для  $IT11$  и диапазона  $D = 80 \div 120$  определяем допуск на операционный размер чистового точения  $T_2 = 0,22\ \text{мм}$  и устанавливаем предельные отклонения  $es_2 = 0$ ;  $ei_2 = -0,22\ \text{мм}$ .

Таким образом, предварительное шлифование обеспечивает уточнение

$$\varepsilon_3 = \frac{T_2}{T_3} = \frac{0,22}{0,05} = 4,07$$

Чистовому точению предшествует операция чернового точения, на которой согласно табл. 7.2 достигают точность диаметрального размера по  $IT12$ , шероховатость поверхности  $Ra\ 50$ ,  $h = 60\ \text{мкм} = 0,060\ \text{мм}$ . По табл. 7.4 для диапазона  $D = 80 \div 120\ \text{мм}$  находим допуск на черновое точение  $T_1 = 0,35$  и назначаем предельные отклонения  $es_1 = 0$ ;  $ei_1 = -0,35\ \text{мм}$ .

Следовательно, чистовое точение позволяет получить уточнение:

$$\varepsilon_2 = \frac{T_1}{T_2} = \frac{0,35}{0,22} = 1,6,$$

а черновое точение, которое может выполняться непосредственно по заготовке, обеспечивает уточнение

$$\varepsilon_1 = \frac{T_{\text{зар}}}{T_1} = \frac{3,2}{0,35} = 9,14.$$

Тогда общее уточнение  $\varepsilon_0$ , получаемое согласно (7.4) при выполнении выбранных переходов, составит:

$$\varepsilon_0 = \varepsilon_1 \cdot \varepsilon_2 \cdot \varepsilon_3 \cdot \varepsilon_4 = 9,14 \cdot 1,6 \cdot 4,07 \cdot 1,8 = 107,13 \geq \varepsilon_m = 106,7.$$

Равенство общего  $\varepsilon_0$  и требуемого  $\varepsilon_m$  уточнений ( $\varepsilon_0 \geq \varepsilon_m$ ) свидетель-

ствуется, что выбранные операции обеспечивают требуемую точность изготовления вала. Таким образом, технологический маршрут изготовления вала включает следующие операции 01...05, обеспечивающие поэтапное уточнение заготовки:

получение заготовки – штамповки [ $T_{\text{заг}} = 3,2$  ( $es = 2,1$ ;  $ei = -1,1$ )  $Rz$  150;  $h = 200$  мкм].

05. Токарная черновая [ $IT12$ ,  $T_1 = 0,35$  ( $es_1 = 0$ ;  $ei_1 = -0,35$  мм)  $Ra$  25,  $h = 60$  мкм].

10. Токарная чистовая [ $IT11$ ,  $T_2 = 0,22$  ( $es_2 = 0$ ;  $ei_2 = -0,22$ ),  $Ra$  6,3;  $h = 30$  мкм].

15. Термическая обработка 41...45HRC<sub>3</sub>.

20. Шлифование предварительное [ $IT8$ ,  $T_3 = 0,054$  мм ( $es_3 = 0$ ;  $ei_3 = -0,054$ )  $Ra$  3,2 и  $h = 20$  мкм].

25. Шлифование чистовое [ $IT7$ ,  $T_{\text{дет}} = 0,03$  мм ( $es = -0,03$ ;  $ei = -0,06$ ),  $Ra$  0,8].

## 2. Расчет наименьших припусков

Расчет выполняем согласно выражению (7.8), начиная с последнего перехода.

Для чистового шлифования получаем:

$$2Z_{\text{min}4} = 2[(0,012 + 0,02) + 0,01] = 0,084 \text{ мм.}$$

• Параметр  $R_z = 4 \cdot R_a = 4 \cdot 3,2 = 12,6$  мкм = 0,012 мм и параметр  $h = 20$  мкм получены при предварительном шлифовании.

• Отклонение расположения поверхности  $\Delta_{\Sigma} = 0,01$  определено по табл. 7.2 как погрешность геометрической формы после предварительного шлифования.

• Погрешность установки  $\varepsilon = 0$ , так как чистовое шлифование выполняется после предварительного шлифования без переустановки заготовки.

Для предварительного шлифования:

$$2 \cdot Z_{\text{min}3} = 2 \cdot [(0,025 + 0,03) + (0,272^2 + 0,055^2)^{0,5}] = 0,231 \text{ мм.}$$

Параметр  $Rz = 4 \cdot Ra = 4 \cdot 6,3 = 25$  мкм = 0,025 мм и параметр  $h = 30$  мкм = 0,03 мм получены при чистовом точении.

Отклонение расположения поверхности заготовки, поступающей на предварительное шлифование  $\Delta_{\Sigma} = 0,036$ , зависит от отклонений, возникающих при чистовом точении  $\Delta_{\text{чист}}$  и при закалке  $\Delta_{\text{терм}}$ :

$$\Delta = (\Delta_{\text{чист}}^2 + \Delta_{\text{терм}}^2)^{0,5} = (0,016^2 + 0,272^2)^{0,5} = 0,272 \text{ мм.}$$

Отклонение расположения поверхности  $\Delta_{\text{чист}} = 0,016$  определено по табл. 7.2 как погрешность геометрической формы после чистового точения.

Величину отклонений, вносимых термообработкой  $\Delta_{\text{терм}}$ , определяем по формуле (7.28), приняв  $n_k = 1$  (объемная закалка), и  $d = 80$  мм:

$$\Delta_{\text{терм}} = 0,001 \cdot n_k \cdot L / (0,1d + 0,3) = 0,001 \cdot 1 \cdot 300 / (0,1 \cdot 80 + 0,3) = 0,272 \text{ мм.}$$

• Погрешность установки заготовки  $\varepsilon$  рассчитана по формуле (7.9), в которой погрешность базирования  $\varepsilon_6$  определена как 0,25 от допуска на диаметральный размер заготовки, полученной после чистового точения:

$$\varepsilon_6 = 0,25 \cdot T_2 = 0,25 \cdot 0,22 = 0,055 \text{ мм,}$$

а погрешность закрепления жесткой детали в центрах принята  $\varepsilon_3 = 0$ .

Для чистового точения получаем:

$$2 \cdot Z_{\text{min}2} = 2 \cdot [(0,1 + 0,060) + (0,16^2 + 0,087^2)^{0,5}] = 0,684 \text{ мм}$$

• Параметр  $Rz = 4 \cdot Ra = 4 \cdot 25 \text{ мкм} = 100 \text{ мкм} = 0,1 \text{ мм}$  и параметр  $h = 60 \text{ мкм} = 0,06 \text{ мм}$  получены при черновом точении.

• Отклонение расположения поверхности  $\Delta_{\Sigma} = 0,160$  мм определено по табл. 7.2 как погрешность геометрической формы после чернового точения.

• Погрешность установки  $\varepsilon = 0,0875$  определена по формуле (7.9) при  $\varepsilon_6 = 0,25 \cdot T_1 = 0,25 \cdot 0,35 = 0,087 \text{ мм}$  и  $\varepsilon_3 = 0$ .

Для чернового точения имеем:

$$2 \cdot Z_{\text{min}1} = 2 \cdot [(0,15 + 0,2) + (1,03^2 + 0,8^2)^{0,5}] = 3,308 \text{ мм.}$$

• Параметр  $Rz = 150 \text{ мкм} = 0,150 \text{ мм}$  и параметр  $h = 200 \text{ мкм} = 0,2 \text{ мм}$  относятся к обрабатываемой поверхности заготовки.

• Отклонение расположения поверхности  $\Delta_{\Sigma} = 0,160$  мм рассчитано по формуле, приведенной в табл. 7.9 для валов, устанавливаемых в центрах:

$$\Delta_{\Sigma} = \sqrt{\Delta_{\text{кор}}^2 + \Delta_{\text{ц}}^2},$$

где  $\Delta_{\text{кор}}$  – коробление поверхности заготовки, определяемое по (7.12);

$$\Delta_{\text{кор}} = \Delta_{\text{уд}} \cdot L = 0,002 \cdot 300 = 0,6 \text{ мм с использованием данных табл. 7.5}$$

$\Delta_{\text{ц}}$  – смещение базовых центров, возникающее при зацентровке заготовки, устанавливаемой в самоцентрирующихся тисках (см. табл. 7.5):

$$\Delta_{\Sigma} = (0,6^2 + 0,838^2)^{0,5} = 1,03 \text{ мм.}$$

В результате получаем  $\Delta_{\text{ц}} = 0,25 \cdot (3,2^2 + 1)^{0,5} = 0,838 \text{ мм}$  и в сумме,

$$\Delta_{\Sigma} = (0,6^2 + 0,838^2)^{0,5} = 1,03 \text{ мм.}$$

• Погрешность установки  $\varepsilon = 0,8$  определена по формуле (7.9) при  $\varepsilon_6 = 0,25 \cdot T_1 = 0,25 \cdot 3,2 = 0,8 \text{ мм}$  и  $\varepsilon_3 = 0$ .

### 3. Расчет наибольших припусков

Расчет наибольших припусков  $Z_{\text{max}i}$  выполняем согласно (7.14):

$$\begin{aligned}
2 \cdot Z_{\max 4} &= 2 \cdot Z_{\min 4} + T_{\text{дет}} + T_3 = 0,084 + 0,03 + 0,054 = 0,168 \text{ мм}; \\
2 \cdot Z_{\max 3} &= 2 \cdot Z_{\min 3} + T_3 + T_2 = 0,231 + 0,054 + 0,22 = 0,505 \text{ мм}; \\
2 \cdot Z_{\max 2} &= 2 \cdot Z_{\min 2} + T_2 + T_1 = 0,684 + 0,22 + 0,35 = 1,254 \text{ мм}; \\
2 \cdot Z_{\max 1} &= 2 \cdot Z_{\min 1} + T_1 + T_{\text{заг}} = 3,308 + 0,35 + 3,2 = 6,858 \text{ мм}.
\end{aligned}$$

#### 4. Расчет номинальных припусков

Расчет номинальных припусков  $Z_{Hi}$  выполняем согласно (7.17) с учетом расположения допусков относительно номинальных размеров.

Чистовое шлифование (см. рис. 7.5, а):

$$2Z_{H4} = 2\vec{Z}_{\min 4} + \vec{\Delta}_3^H - \vec{\Delta}_{\text{дет}}^B; \quad 2Z_{H4} = 0,084 + 0,054 - 0,03 \text{ мм}.$$

Предварительное шлифование (см. рис. 7.5, б):

$$2Z_{H3} = 2\vec{Z}_{\min 3} + \vec{\Delta}_2^H + \vec{\Delta}_3^B; \quad 2Z_{H3} = 0,231 + 0,22 + 0 = 0,451 \text{ мм}.$$

Чистовое точение (см. рис. 7.5, в):

$$2Z_{H2} = 2\vec{Z}_{\min 2} + \vec{\Delta}_1^H + \vec{\Delta}_2^B; \quad 2Z_{H2} = 0,684 + 0,35 + 0 = 1,034 \text{ мм}.$$

Черновое точение (см. рис. 7.5, г):

$$2Z_{H1} = 2\vec{Z}_{\min 1} + \vec{\Delta}_{\text{заг}}^H + \vec{\Delta}_1^B; \quad 2Z_{H1} = 3,308 + 1,1 + 0 = 4,408 \text{ мм}.$$

#### 5. Расчет операционных размеров и размера заготовки

Расчет выполняем согласно (7.22), (7.23).

Чистовое шлифование

$$D_4 = D_{\text{дет}} = 80_{-0,06}^{0,03}.$$

Предварительное шлифование

$$D_3 = D_{\text{дет}} + 2Z_{H4}, \quad D_3 = 80 + 0,108 = 80,108 \cong 80,11_{-0,05}^0.$$

Чистовое точение

$$D_2 = D_{\text{дет}} + 2Z_{H4} + 2Z_{H3}, \quad D_2 = 80 + 0,108 + 0,451 = 80,559 \cong 80,6_{-0,22}^0.$$

Черновое точение

$$\begin{aligned}
D_1 &= D_{\text{дет}} + 2Z_{H4} + 2Z_{H3} + 2Z_{H2} \\
D_1 &= 80 + 0,108 + 0,451 + 1,034 = 81,593 \cong 81,6_{-0,35}^0.
\end{aligned}$$

Рассчитанные операционные размеры даны с округлением в соответствии с размерами применяемых контрольных калибров.

#### 6. Расчет размеров заготовки:

$$\begin{aligned}
D_{\text{заг}} &= D_{\text{дет}} + 2Z_{H4} + 2Z_{H3} + 2Z_{H2} + 2Z_{H1} \\
D_{\text{заг}} &= 80 + 0,108 + 0,451 + 1,034 + 4,408 = 86,001 \cong 86_{-1,1}^{2,1}.
\end{aligned}$$

Полученный диаметральный размер заготовки округляют до ближайшего целого значения.

Таким образом, общий припуск  $2 \cdot Z_{\text{об}}$  на обработку вала составляет:

$$2 \cdot Z_{\text{об}} = D_{\text{заг}} - D_{\text{дет}}, \quad 2 \cdot Z_{\text{об}} = 86 - 80 = 6 \text{ мм}.$$

Припуск на токарную обработку вала:

$$2Z_{\text{ток}} = D_{\text{заг}} - D_2 = 86 - 80,6 = 5,4 \text{ мм},$$

который включает припуск на черновое точение

$$2 \cdot Z_1 = D_{\text{заг}} - D_1 = 86 - 81,6 = 4,4 \text{ мм}$$

и припуск на чистовое точение

$$2 \cdot Z_2 = D_1 - D_2 = 81,6 - 80,6 = 1 \text{ мм.}$$

Припуск, оставляемый на круглое шлифование.

$$2 \cdot Z_{\text{шл}} = D_2 - D_{\text{дет}} = 80,6 - 80 = 0,6 \text{ мм.}$$

### *7. Расчет погрешности установки аналитическими методами теории баз*

В тех случаях, когда приближенные методы расчета не позволяют достоверно оценить погрешность установки, целесообразно использовать аналитические методы теории баз [22].

Согласно теории баз погрешность установки характеризует вектор  $\omega_y = (a_y, b_y, c_y, \lambda_y, \beta_y, \gamma_y)$ , составляющие которого ( $a_y, b_y, c_y$  – параметры смещения и  $\lambda_y, \beta_y, \gamma_y$  – параметры поворота) определяют отклонение координатной системы ( $X, Y, Z$ ) технологических баз устанавливаемой заготовки относительно системы координат ( $x, y, z$ ) базовых поверхностей приспособления.

Отклонение обрабатываемой поверхности заготовки  $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$  от требуемого положения в направлении размера, получаемого от соответствующей технологической базы, проявляется как приведенная погрешность установки [18]. Она зависит как от составляющих вектора  $\omega_y$ , так и от положения этой поверхности относительно технологических баз заготовки.

Рассмотрим формирование погрешности установки от различных технологических баз для трех типовых схем базирования, представленных на рис. 5.9. Каждой из представленных на рис. 5.9 типовых схем базирования соответствует определенный комплект технологических баз, состоящий из трех базирующих поверхностей:

- базирование по трем плоскостям (см. рис. 5.9, а) включает установочную, направляющую и опорную базы;
- базирование по плоскости и двум отверстиям (см. рис. 5.9, б) включает установочную, двойную опорную и опорную базы;
- базирование по главному отверстию на конусах (см. рис. 5.9, в) включает двойную направляющую и две опорные базы.

Так как каждой из базирующих поверхностей соответствует определенная координатная плоскость, то операционные размеры, получаемые от соответствующих баз и формируемые при этом отклонения  $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$  имеют направления соответствующих координатных осей.

Для трех типовых схем базирования, представленных на рис. 5.9, отклонения размера установки  $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$ , формируемые по нормали к каждой из трех баз, могут быть рассчитаны по приведенным в разд. 5.3 матричным формулам (5.7) – (5.9).

Согласно выражению (5.7) при базировании по трем плоскостям (рис. 5.9, а) отклонения размера установки, формируемые в направлении технологических баз, составляют:

– в направлении нормали к установочной базе

$$\varepsilon_z^{(уст)} = c_y^{(уст)} + \lambda_y^{(уст)} \cdot y + \beta_y^{(уст)} \cdot x; \quad (7.30)$$

– в направлении нормали к направляющей базе

$$\varepsilon_y^{(нап)} = b_y^{(нап)} + \lambda_y^{(уст)} \cdot z + \gamma_y^{(нап)} \cdot x; \quad (7.31)$$

– в направлении нормали к опорной базе

$$\varepsilon_x^{(оп)} = a_y^{(оп)} + \beta_y^{(уст)} \cdot z + \gamma_y^{(нап)} \cdot x, \quad (7.32)$$

где  $c_y^{(уст)}, \lambda_y^{(уст)}, \beta_y^{(уст)}$  – составляющие вектора погрешности установки  $\omega_y$ , формируемые на установочной базе;

$b_y^{(нап)}, \gamma_y^{(нап)}$ , – составляющие вектора  $\omega_y$ , формируемые на направляющей базе;

$a_y^{(оп)}$  – параметр смещения, формируемый на опорной базе.

При базировании заготовки по конструктивно оформленным опорным элементам параметр смещения  $c_y^{(уст)}$ , формируемый на установочной базе, составляет

$$c_y^{(уст)} = 0,5 \cdot h, \quad (7.33)$$

где  $h$  – погрешность формы поверхности установочной базы.

Погрешность формы  $h$  (отклонения от плоскостности, прямолинейности и параллельности) регламентируется (ГОСТ 24643-81) с учетом допуска на размер между рассматриваемыми поверхностями и уровня относительной геометрической точности А, В, С. Это позволяет по таблицам [8] определить необходимые для расчета численные значения отклонений. В общем случае отклонения формы  $h$  можно определить как часть допуска  $IT$  на размер между рассматриваемыми поверхностями:

$$h = k \cdot IT, \quad (7.34)$$

где  $k$  – коэффициент, определяющий соотношение  $h / IT$ .

В соответствии с рекомендациями ГОСТ по определению уровня относительной геометрической точности плоских поверхностей деталей коэффициент  $k$  имеет следующие оценочные значения:

Относительная геометрическая точность поверхностей деталей		
нормальная (группа А)	повышенная (группа В)	высокая (группа С)
$\frac{h}{IT} 100 = 60 \%$	$\frac{h}{IT} 100 = 40 \%$	$\frac{h}{IT} 100 = 25 \%$
$k = 0,6$	$k = 0,4$	$k = 0,25$

Таким образом, в общем случае отклонение формы поверхности  $h$ , определяемое как часть допуска  $IT$  на размер, координирующий данную плоскость, можно оценить коэффициентом  $k$ , который может принимать следующие значения:

Относительная геометрическая точность поверхности	Соотношение отклонения формы $h$ и допуска $IT$ на размер	Значения коэффициента $k$
нормальная (группа А)	$0,4 \cdot IT < h \leq 0,6 \cdot IT$ ;	$0,4 < k \leq 0,6$
повышенная (группа В)	$0,4 \cdot IT \geq h > 0,25 \cdot IT$ ;	$0,4 \geq k > 0,25$
высокая (группа С)	$h \leq 0,25 \cdot IT$ .	$k \leq 0,25$

С учетом (7.34) выражение (7.33) можно записать:

$$c_y^{(уст)} = 0,5 \cdot k \cdot IT. \quad (7.35)$$

В соответствии с (7.35) параметры смещения  $c_y^{(уст)}$ , формируемые на установочной базе, можно рассчитать по формулам:

Относительная геометрическая точность установочной базовой поверхности		
нормальная (группа А),	повышенная (группа В)	высокая (группа С)
$k = 0,6$	$k = 0,4$	$k = 0,25$
$c_y^{(уст)} = 0,3 \cdot IT$	$c_y^{(уст)} = 0,2 \cdot IT$	$c_y^{(уст)} = 0,12 \cdot IT$

Параметры относительного поворота  $\lambda_y^{(уст)}$ ,  $\beta_y^{(уст)}$ , формируемые по установочной базе, соответственно составляют:

$$\lambda_y^{(уст)} = \frac{h}{4L_y}; \quad (7.36)$$

$$\beta_y^{(уст)} = \frac{h}{4L_x}; \quad (7.37)$$

где  $L_y$  и  $L_x$  – расстояния между опорными элементами установочной базы в направлении осей  $Y$  и  $X$ .

С учетом (7.34) выражения (7.36), (7.37) принимают вид

$$\lambda_y^{(уст)} = \frac{h \cdot k \cdot IT}{4L_y}; \quad (7.38)$$

$$\beta_y^{(уст)} = \frac{h \cdot k \cdot IT}{4L_x}. \quad (7.39)$$

Согласно (7.38), (7.39) параметры поворота  $\lambda_y^{(уст)}$ ,  $\beta_y^{(уст)}$ , формируемые на установочной базе различной геометрической точности, можно рассчитать по формулам:

Относительная геометрическая точность установочной базы		
нормальная (группа А), $k = 0,6$	повышенная (группа В) $k = 0,4$	высокая (группа С) $k = 0,25$
$\lambda_y^{(уст)} = \frac{0,15 \cdot IT}{4L_y}$	$\lambda_y^{(уст)} = \frac{0,1 \cdot IT}{4L_y}$	$\lambda_y^{(уст)} = \frac{0,03 \cdot IT}{4L_y}$
$\beta_y^{(уст)} = \frac{0,15 \cdot IT}{4L_x}$	$\beta_y^{(уст)} = \frac{0,1 \cdot IT}{4L_x}$	$\beta_y^{(уст)} = \frac{0,03 \cdot IT}{4L_x}$

Величина смещения  $b_y^{(нап)}$ , формируемая на направляющей базе, зависит от погрешности геометрической формы  $h$  направляющей базы и от перпендикулярности направляющей базы относительно установочной. С учетом вероятностного характера проявления этих отклонений имеем

$$b_y^{(нап)} = 0,5 \sqrt{h^2 + (IT_v \cdot Z)^2}, \quad (7.40)$$

где  $Z$  – расстояние от установочной базы до опорных элементов направляющей базы;

$IT_v$  – допуск, ограничивающий отклонения от перпендикулярности направляющей базы относительно установочной.

Представив погрешность геометрической формы  $h$  как часть допуска  $IT$  на размер, ограничиваемый поверхностью направляющей базы, получим

$$b_y^{(нап)} = 0,5 \sqrt{(k \cdot IT)^2 + (IT_v \cdot Z)^2}. \quad (7.41)$$

Параметр поворота  $\gamma_y^{(нап)}$ , формируемый на направляющей базе,

$$\lambda_y^{(нап)} = \frac{h}{4L_n} \text{ и с учетом (7.34) имеем } \lambda_y^{(нап)} = \frac{k \cdot IT}{4L_n}, \quad (7.42)$$

где  $L_n$  – расстояние между опорными элементами направляющей базы.

Для базирующих поверхностей различной геометрической точности отклонения поворота  $\gamma_y^{(нап)}$  можно рассчитать по формулам:

Относительная геометрическая точность деталей		
нормальная (группа А), $k = 0,6$	повышенная (группа В) $k = 0,4$	высокая (группа С) $k = 0,25$
$\lambda_y^{(нап)} = \frac{0,15 \cdot IT}{L_n}$	$\lambda_y^{(нап)} = \frac{0,4 \cdot IT}{L_n}$	$\lambda_y^{(нап)} = \frac{0,25 \cdot IT}{L_n}$

Параметр смещения  $a_y^{(оп)}$ , формируемый на опорной базе, зависит от геометрической формы  $h$  и погрешности поворота поверхности опорной базы относительно установочной  $IT_\mu$  и направляющей  $IT_\phi$  баз:

$$a_y^{(оп)} = 0,5 \cdot \sqrt{h^2 + (IT_\mu \cdot L_y)^2 + (IT_\varphi \cdot L_n)^2}, \quad (7.43)$$

где  $L_y, L_n$  – расстояния от опорной точки до установочной и направляющей баз.

С учетом выражения (7.34) формула (7.43) принимает вид

$$a_y^{(оп)} = 0,5 \cdot \sqrt{(k \cdot IT)^2 + (IT_\mu \cdot L_y)^2 + (IT_\varphi \cdot L_n)^2}. \quad (7.44)$$

При базировании заготовки по плоскости и двум базовым отверстиям (см. рис. 5.9, б) отклонения размеров установки  $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$ , формируемые по нормали к технологическим базам, рассчитывают согласно (5.8) по формулам:

– в направлении оси  $X$  от двойной опорной базы

$$\varepsilon_x^{(д.оп)} = a_y^{(д.оп)} + \beta_y^{(уст)} \cdot z + \gamma_y^{(оп)} \cdot y; \quad (7.45)$$

– в направлении оси  $Y$  от двойной опорной базы:

$$\varepsilon_y^{(д.оп)} = b_y^{(д.оп)} + \lambda_y^{(уст)} \cdot z + \gamma_y^{(оп)} \cdot x, \quad (7.46)$$

где составляющие имеют индексы соответствующих баз: (уст) – установочная; (д.оп) – двойная опорная; (оп) – опорная.

Составляющие вектора погрешности установки  $\omega_y$ , формируемые на установочной базе  $c_y^{(уст)}, \lambda_y^{(уст)}, \beta_y^{(уст)}$ , определяют по формулам (7.33), (7.36) и (7.37). Погрешность установки  $\varepsilon_z$  в направлении размера, получаемого от установочной базы, рассчитывают по формуле (7.30).

Составляющие погрешности установки  $a_y^{(д.оп)}, b_y^{(д.оп)}$ , формируемые на двойной опорной базе, роль которой выполняет отверстие и цилиндрический палец, определяют по формуле

$$a_y^{(д.оп)} = b_y^{(д.оп)} = 0,25(\Delta_{D_1}^B - \Delta_{П_1}^H), \quad (7.47)$$

где  $\Delta_{D_1}^B, \Delta_{П_1}^H$  – предельные отклонения диаметральных размеров базового отверстия и пальца.

Параметр поворота  $\gamma_y^{(оп)}$ , формируемый на опорной базе, роль которой выполняет второе отверстие и срезанный (ромбический) палец, определяют по формуле:

$$\gamma_y^{(оп)} = \frac{1}{6L}[(\Delta_{D_1}^B - \Delta_{П_1}^H) - (\Delta_{D_2}^B - \Delta_{П_2}^H)], \quad (7.48)$$

где  $\Delta_{D_2}^B, \Delta_{П_2}^H$  – предельные отклонения диаметральных размеров второго базового отверстия и ромбического пальца;

$L$  – расстояние между базовыми отверстиями.

Таким образом, согласно (7.45), (7.46) с учетом (7.47) отклонения размеров  $\varepsilon_x^{(д.оп)}, \varepsilon_y^{(д.оп)}$ , получаемых от двойной опорной базы в направлении осей  $X$  и  $Y$ , составляют:

$$\varepsilon_x^{(д.оп)} = 0,25(\Delta_{D_1}^B - \Delta_{П_1}^H) + \beta_y^{(уст)} \cdot z + \gamma_y^{(оп)} \cdot y, \quad (7.49)$$

$$\varepsilon_y^{(\text{д.оп})} = 0,25(\Delta_{D_1}^B - \Delta_{\Pi_1}^H) + \lambda_y^{(\text{уст})} \cdot z + \gamma_y^{(\text{оп})} \cdot x. \quad (7.50)$$

При базировании с использованием двойной направляющей базы, например установке корпуса по двум главным отверстиям на конусах (рис. 5.9, в), отклонения размеров установки  $\varepsilon_y^{(\text{д.н})}$ ,  $\varepsilon_z^{(\text{д.н})}$ ,  $\varepsilon_x^{(\text{оп})}$  в направлении технологических баз определяют по формуле (5.9), которая в развернутой записи имеет вид:

$$\varepsilon_x^{(\text{оп})} = a_y^{(\text{оп})} + \beta_y^{(\text{д.н})} \cdot z + \gamma_y^{(\text{д.н})} \cdot y; \quad (7.51)$$

$$\varepsilon_x^{(\text{д.н})} = b_y^{(\text{д.н})} + \lambda_y^{(\text{оп})} \cdot z + \gamma_y^{(\text{д.н})} \cdot x; \quad (7.52)$$

$$\varepsilon_z^{(\text{д.н})} = c_y^{(\text{д.н})} + \lambda_y^{(\text{оп})} \cdot y + \beta_y^{(\text{д.н})} \cdot x, \quad (7.53)$$

где  $x, y, z$  – координаты краевых точек на рассматриваемых поверхностях корпуса.

Индексы на составляющих вектора  $\omega_y$  определяют базы, на которых формируются соответствующие погрешности: (д.н) – двойная направляющая база, (оп) – опорная база.

Параметры смещения  $b_y^{(\text{д.н})}$ ,  $c_y^{(\text{д.н})}$ , формируемые по двойной направляющей базе, можно рассчитать по формуле

$$b_y^{(\text{д.н})} = c_y^{(\text{д.н})} = 0,5IT_k, \quad (7.54)$$

где  $IT_k$  – допуск круглости отверстий, используемых в качестве технологических баз.

Параметры поворота  $\beta_y^{(\text{д.н})}$ ,  $\gamma_y^{(\text{д.н})}$ , формируемые по двойной направляющей базе, составляют

$$\beta_y^{(\text{д.н})} = \gamma_y^{(\text{д.н})} = \frac{IT_c}{6L}, \quad (7.55)$$

где  $IT_c$  – допуск соосности двух базовых отверстий;

$L$  – расстояние между базовыми отверстиями.

Параметр смещения  $a_y^{(\text{оп})}$ , формируемый на опорной базе, составляет:

$$a_y^{(\text{оп})} = 0,5 \cdot \sqrt{h^2 + (IT_\psi \cdot L)^2},$$

где  $h$  – погрешность геометрической формы опорной базы;

$IT_\psi$  – допуск перпендикулярности опорной поверхности относительно оси отверстия;  $L$  – расстояние от центра отверстия до опорной точки.

Параметр поворота  $\lambda_y^{(\text{оп})}$ , возникающий на второй опорной базе:

$$\lambda_y^{(\text{оп})} = \frac{0,5 \cdot h}{L}, \quad (7.56)$$

где  $h$  – погрешность геометрической формы базирующей поверхности;

$L$  – расстояние от центра отверстия до опорной точки.

Допуски, ограничивающие отклонения от круглости  $IT_k$  и цилиндричности  $IT_\psi$  наружных и внутренних цилиндрических поверхностей, определяются согласно ГОСТ 24643-81, в котором исходя из соотно-

шения допуска формы  $T_\phi$  и допуска на диаметральный размер  $T_D$  различают относительную геометрическую точность цилиндрической поверхности:

Относительная геометрическая точность цилиндрической поверхности		
нормальная (группа А)	повышенная (группа В)	высокая (группа С)
$\frac{T_\phi}{T_D} \cdot 100 = 30 \%$	$\frac{T_\phi}{T_D} \cdot 100 = 20 \%$	$\frac{T_\phi}{T_D} \cdot 100 = 12 \%$
$k = T_\phi / T_D = 0,3$	$k = T_\phi / T_D = 0,2$	$k = T_\phi / T_D = 0,12$

ГОСТ 24643-81 предусматривает также поверхности вращения особо высокой точности.

#### 7.4. Выявление и расчет технологических размерных связей при назначении припусков

Во многих случаях получаемые на детали размеры определяются точностью выполнения не одной, а нескольких технологических операций. Это обычно имеет место при изготовлении деталей на настроенных станках-автоматах и полуавтоматах, когда технологические базы, от которых получают операционный размер не совпадают с конструкторскими. Для определения точности такого размера необходимо выявить соответствующую технологическую цепь, в которой рассматриваемый размер является замыкающим звеном (см. рис. 4.3).

Несовпадение технологических баз с конструкторскими приводит также к изменению положения обрабатываемой поверхности относительно требуемого положения. Это влечет за собой образование на обрабатываемой поверхности дополнительной припуска  $Z_{\text{доп}}$ . Возникающие в этих случаях отклонения припуска в меньшую сторону могут привести к тому, что фактический слой металла  $Z_\phi$  на обрабатываемой поверхности оказывается меньше расчетного наименьшего припуска  $Z_\phi < Z_{\text{min}}$ :

$$Z_\phi = Z_{\text{min}} - Z_{\text{доп}} \Rightarrow Z_\phi < Z_{\text{min}} .$$

Это обстоятельство неизбежно приведет к появлению бракованной детали.

С другой стороны, отклонения припуска в большую сторону приводят к тому, что фактический припуск превышает наибольшее значения  $Z_\phi > Z_{\text{max}}$ .

$$Z_{\phi} = Z_{\min} + Z_{\text{доп}} \Rightarrow Z_{\phi} > Z_{\max}.$$

В этом случае возникает необходимость выполнения дополнительных проходов, что неизбежно приводит к потере производительности обработки.

Для исключения этих негативных явлений расчет припусков необходимо выполнять с учетом отклонений обрабатываемых поверхностей, которые возникают при несовпадении выбираемых технологических баз с конструкторскими.

С этой целью рассматриваемый на поверхности номинальный припуск  $Z_{\text{н}}^*$  представляют как замыкающее звено соответствующей технологической размерной цепи, составляющими звеньями которой являются операционные размеры и размеры заготовки. Эту размерную цепь выявляют и рассчитывают в номиналах, определяя  $Z_{\text{н}}^*$ .

Зная номинальный припуск  $Z_{\text{н}}^*$ , находят формируемый на обрабатываемой поверхности наименьший припуск  $Z_{\min}^*$  для плоских поверхностей:

$$Z_{\min}^* = Z_{\text{н}}^* - (\Delta_{i-1}^{\text{H}^*} + \Delta_i^{\text{B}^*}), \quad (7.57)$$

где  $\Delta_i^{\text{H}^*}$  – нижнее отклонение размера заготовки;

$\Delta_i^{\text{B}^*}$  – верхнее отклонение размера, получаемого на данной операции.

Полученные значения  $Z_{\min}^*$  следует сравнить с расчетной величиной наименьшего припуска  $Z_{\min}$  для данной поверхности. Если окажется, что  $Z_{\min}^* < Z_{\min}$ , то для достижения требуемого равенства  $Z_{\min}^* = Z_{\min}$  необходимо изменить величину номинального припуска  $Z_{\text{н}}^*$ , формируемого на рассматриваемой поверхности. Для этого необходимо внести поправку  $\Delta_{\Sigma}$  в номинальные размеры одного или нескольких звеньев технологической размерной цепи. Внесение поправки  $\Delta_{\Sigma}$  позволяет добавить на обрабатываемую поверхность металл, компенсируя, таким образом, уменьшение наименьшего припуска:

$$\text{при } Z_{\min}^* < Z_{\min} \quad \Delta_{\Sigma} = Z_{\text{доп}} = Z_{\min} - Z_{\min}^* \quad (7.58)$$

$$\text{и с учетом (7.57) } \Delta_{\Sigma} = Z_{\text{доп}} = Z_{\min} - Z_{\text{н}}^* + (\Delta_{i-1}^{\text{H}^*} + \Delta_i^{\text{B}^*}). \quad (7.59)$$

В тех случаях, когда  $Z_{\min}^* > Z_{\min}$  необходимо определить значение образуемого на поверхности дополнительного припуска:

$$Z_{\text{доп}} = Z_{\min}^* - Z_{\min}. \quad (7.60)$$

При этом следует рассчитать также возможную величину наибольшего припуска, формируемого на данной поверхности:

$$Z_{\max}^* = Z_{\text{н}}^* + (\Delta_{i-1}^{\text{B}^*} + \Delta_i^{\text{H}^*}), \quad (7.61)$$

где  $\Delta_{i-1}^{\text{B}^*}$  – верхнее отклонение размера заготовки;

$\Delta_i^{H*}$  – нижнее отклонение размера, получаемого на данной операции.

Если значение  $Z_{\text{доп}}$  сравнительно мало и величина формируемого припуска  $Z_{\text{min}}$  не выходит за пределы расчетного наибольшего припуска  $Z_{\text{min}}^* \leq Z_{\text{max}}^*$ , то обработку выполняют за один проход, при этом возможна коррекция скорости резания или подачи в сторону их уменьшения. Однако, если величина формируемого дополнительного припуска  $Z_{\text{доп}}$  значительна и  $Z_{\text{min}}^* > Z_{\text{max}}^*$ , то для его удаления следует выполнять несколько проходов. Необходимое количество проходов  $n$  определяют путем сравнения наибольшего припуска  $Z_{\text{max}}^*$ , формируемого на данной поверхности в результате смены баз, и наибольшего расчетного припуска  $Z_{\text{max}}$ :

$$n = \frac{Z_{\text{max}}^*}{Z_{\text{max}}} \quad (7.62)$$

При обработке в корпусных деталях пролитых отверстий дополнительный припуск  $Z_{\text{доп}}$  на обрабатываемой цилиндрической поверхности возникает в результате смещения  $\Delta_{\text{ц}}$  оси получаемого на детали (чистого) отверстия относительно оси (черного) отверстия заготовки  $Z_{\text{доп}} = \Delta_{\text{ц}}$ .

Оценить возникающее смещение  $\Delta_{\text{ц}}$  возможно путем выявления и расчета двух размерных цепей  $A_{\Delta}$  и  $B_{\Delta}$ , определяющих положение центра рассматриваемого отверстия относительно технологических баз заготовки (например, относительно установочной и направляющей баз корпуса). Условием получения наименьшего смещения  $\Delta_{\text{ц}} \Rightarrow 0$  является совпаде-

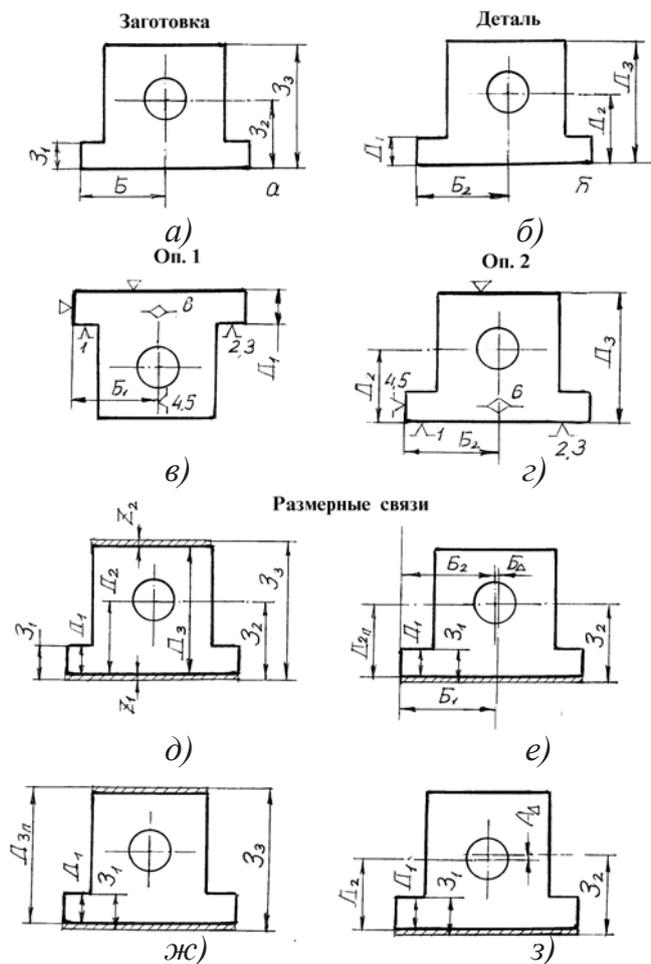


Рис. 7.7. Формирование технологических размерных связей при изготовлении корпусной детали: а – эскиз заготовки; б – эскиз детали; операционные эскизы: в – операция 1; г – операция 2; д, е, ж, з – схемы технологических размерных связей

ние осей чистого и черного отверстий. Для этого при расчете технологических размерных цепей в номиналах необходимо обеспечить нулевые значения замыкающих звеньев:

$$A_{\Delta} = 0 \text{ и } B_{\Delta} = 0.$$

Рассмотрим изложенное подробнее на примере расчета припусков для корпусной детали, изготавливаемой на двух многоцелевых станках (рис. 7.7). На первой операции при базировании корпуса по полкам (рис. 7.7, в) производят фрезерование основания и двух боковых поверхностей, которые на второй операции используют в качестве технологических баз. На второй операции (рис. 7.7, з) обрабатывают верхнюю плоскость и растачивают главное отверстие.

### **Выбор заготовки корпуса**

В качестве заготовки для корпуса выбираем отливку из серого чугуна СЧ15, получаемую литьем в песчано-глинистые формы. Точность такой отливки составляет 8-6-10-9 ГОСТ 26645-85 9 (см. § 9.3 ч. 2 данного учебника)

По таблицам [22] для 10 степени точности поверхности принимаем ряд припусков 5. Из таблиц [22] для 8-го класса размерной точности отливки и соответствующих номинальных размеров находим допуски на размеры отливки:

Размеры	$30 + Z_0$	$200 + Z_0$	$300 + Z_0$
Допуски, мм	1,1	1,8	2

В приведенной таблице  $Z_0$  означает прибавляемый общий припуск, величина которого рассчитывается ниже.

По таблице [22] для поверхности 10-й степени точности находим допуск на неровность поверхности отливки 0,4 мм. По таблицам [22] для отливок 6-ой степени коробления с учетом номинальных размеров находим допуски формы и расположения элементов отливки: для верхней плоскости и плоскости основания – 1,2 мм; для отверстия – 0,8 мм; для полок – 0,4 мм.

Из таблиц, приводимых в [22], на основе полученных допусков на размеры, форму и расположение поверхностей находим общие допуски на размеры отливки и назначаем предельные отклонения:

Размеры	$30 + Z_0$ (для $Z_1$ )	$200 + Z_0$ (для $Z_2$ )	$300 + Z_0$ (для $Z_3$ )
Общие допуски	1,4	2,2	2,4
Предельные отклонения	$\pm 0,7$	$\pm 1,1$	$\pm 1,2$

Обработку корпуса выполняют на двух многоцелевых станках за две установки. На первой операции (рис. 7.1, а) обрабатывают основание и боковую поверхность. При этом получают  $D_1 = 30 \pm 0,25$  и  $B_1 = 150 \pm 0,3$ , а на второй обрабатывают верхнюю плоскость и главное отверстие, обеспечивая точность  $D_3 = 300 \pm 0,15$  и  $\Phi 50H7$ .

### **Выявление и расчет технологических размерных цепей**

Размеры заготовки  $Z_1$  и  $Z_3$  получают путем прибавления к размерам детали  $D_1$  и  $D_3$  припусков  $Z_1$  и  $Z_2$ , рассчитываемых соответственно для плоскости основания, обрабатываемой на первой операции (см. рис. 7.7, в), и для верхней плоскости  $Z_2$ , обрабатываемой на второй операции (см. рис. 7.7, з):

$$Z_1 = D_1 + Z_1; \quad (7.63)$$

$$Z_3 = D_3 + Z_1 + Z_2. \quad (7.64)$$

Номинальные значения припусков  $Z_1$  и  $Z_3$  составляют

$$Z_1 = Z_{\min 1} + \Delta_{D_1}^B + \Delta_{D_3}^H; \quad (7.65)$$

$$Z_2 = Z_{\min 2} + \Delta_{D_3}^B + \Delta_{D_3}^H. \quad (7.66)$$

Операционный размер  $D_{3П}$ , полученный на первой операции, образуется как замыкающее звено цепи предшествующих размеров, в том числе и размеров заготовки. На рис. 7.7, ж представлена технологическая размерная цепь, замыкающим звеном которой является размер  $D_{3П}$ :

$$D_{3П} = D_1 - Z_1 + Z_3. \quad (7.67)$$

Предельные отклонения размера  $D_{3П}$ , соответственно составляют:

$$- \text{верхнее } \Delta_{D_{3П}}^B = \Delta_{D_1}^e - \Delta_{Z_1}^H + \Delta_{Z_3}^B; \quad (7.68)$$

$$- \text{нижнее } \Delta_{D_{3П}}^H = \Delta_{D_1}^H - \Delta_{Z_1}^B + \Delta_{Z_3}^H. \quad (7.69)$$

Подставим  $\Delta_{D_{3П}}^H$  в выражение (7.66) и окончательно получим номинальный припуск  $Z_2$  для верхней плоскости корпуса:

$$Z_2 = Z_{\min 2} + \Delta_{D_3}^B + (\Delta_{D_1}^H - \Delta_{Z_1}^B + \Delta_{Z_3}^H). \quad (7.70)$$

Размер заготовки  $Z_2$ , определяющий расстояние от оси отверстия до плоскости основания корпуса, найдем по формуле

$$Z_2 = D_2 + Z_1, \quad (7.71)$$

где  $D_2$  – соответствующий номинальный размер детали;

$Z_1$  – общий номинальный припуск на обработку плоскости основания.

При расчете припуска в главном отверстии также необходимо учитывать отклонения операционного размера  $D_{2П}$ , определяющего положение оси черного отверстия относительно технологической базы (рис. 7.7, е) и отклонения размера  $D_2$ . Неравномерность припуска в отверстии определяют как смещение оси получаемого чистового отверстия

относительно оси черного отверстия  $A_{\Delta}$ . Схема размерной цепи  $A_{\Delta}$ , определяющей это смещение для рассматриваемой корпусной детали, представлена на рис. 7.7, з:

$$A_{\Delta} = Z_2 - Z_1 + D_1 - D_2. \quad (7.72)$$

В результате расчета размерной цепи  $A_{\Delta}$  в номиналах необходимо получить совмещение осей чистого и черного отверстий  $A_{\Delta} = 0$ .

Однако возможные предельные отклонения при этом составят

$$\Delta_{A_{\Delta}}^B = (\Delta_{Z_2}^B + \Delta_{D_1}^B) - (\Delta_{Z_1}^H + \Delta_{D_2}^H); \quad (7.73)$$

$$\Delta_{A_{\Delta}}^H = (\Delta_{Z_2}^H + \Delta_{D_1}^H) - (\Delta_{Z_1}^B + \Delta_{D_2}^B). \quad (7.74)$$

Неравномерность припуска проявляется в виде эксцентриситета как при верхнем  $\Delta_{A_{\Delta}}^B$ , так и при нижнем  $\Delta_{A_{\Delta}}^H$  отклонениях. Она приводит к уменьшению рассчитанного минимального припуска на первом переходе:

$$Z_{\min}^* = Z_{\min} - \Delta_{A_{\Delta}}^{\max}.$$

Для учета влияния смещения  $\Delta_{A_{\Delta}}$  и исключения возможного брака необходимо ввести дополнительную составляющую в  $Z_{\min}$  первого перехода, увеличив его на наибольшую абсолютную величину  $(\Delta_{A_{\Delta}})^{\max}$  одного из приведенных отклонений:

$$Z_{\min}^* = Z_{\min} - \Delta_{A_{\Delta}}^{\max}, \quad (7.75)$$

где  $\Delta_{A_{\Delta}}^{\max} = \Delta_{A_{\Delta}}^B$ , когда верхнее отклонение по абсолютному значению выше нижнего, или  $\Delta_{A_{\Delta}}^{\max} = \Delta_{A_{\Delta}}^H$ , когда нижнее отклонение по абсолютному значению выше верхнего.

Смещение оси чистого отверстия относительно черного имеет место как в вертикальном  $A_{\Delta}$ , так и горизонтальном  $B_{\Delta}$  направлениях. Поэтому в общем случае предусматривают также выявление и расчет размерной цепи  $B_{\Delta}$ , определяющей смещение осей отверстий в горизонтальной плоскости (см. рис. 7,7, е). В начале следует аналогично (7.72) выполнить расчет цепи  $B_{\Delta}$  в номиналах, обеспечив равенство  $B_{\Delta} = 0$ . А затем рассчитать предельные отклонения:

$$\Delta_{B_{\Delta}}^e = \sum_{i=1}^k \bar{\Delta}_{B_i}^B - \sum_{k=k+1}^{m-1} \bar{\Delta}_{B_i}^H; \quad \Delta_{B_{\Delta}}^H = \sum_{i=1}^k \bar{\Delta}_{B_i}^H - \sum_{k=k+1}^{m-1} \bar{\Delta}_{B_i}^B.$$

где  $\bar{\Delta}_{3_i}^B, \bar{\Delta}_{3_i}^H, \bar{\Delta}_{3_i}^B, \bar{\Delta}_{3_i}^H$  – соответственно предельные отклонения увеличивающих и уменьшающих звеньев.

Выбирают наибольшее по абсолютной величине предельное отклонение  $\Delta_{B_{\Delta}}^{\max} = \Delta_{B_{\Delta}}^B$  или  $\Delta_{B_{\Delta}}^{\max} = \Delta_{B_{\Delta}}^H$  и рассчитывают суммарное наибольшее возможное смещение оси чистого отверстия относительно черного:

$$\Delta_{E_{\Delta}}^{\max} = \sqrt{|\Delta_{A_{\Delta}}^{\max}|^2 + |\Delta_{3_{\Delta}}^{\max}|^2}. \quad (7.76)$$

Полученное результирующее смещение  $\Delta_{E_{\Delta}}^{\max}$  вносят как дополнительную составляющую в  $Z_{\min 1}$  первого перехода по обработке главного отверстия:

$$Z_{\min}^* = \sqrt{Z_{\min 1}^2 + (\Delta_{E_{\Delta}}^{\max})^2}. \quad (7.77)$$

Таким образом, как показывают приведенные примеры, расчет припусков и межпереходных размеров предусматривает в общем случае выявление технологических размерных связей, определяющих формирование точности размеров, получаемых на соответствующих технологических переходах.

### ***Расчет припуска на плоскость основания корпуса***

В результате обработки основания необходимо обеспечить шероховатость поверхности по  $Ra$  3,2 мкм и выдержать размер полки  $30^{\pm 0,25}$ . Требуемую точность размера  $IT_{\text{дет}} = [0,25 - (-0,25)] = 0,5$  мм и шероховатости поверхности можно обеспечить путем чистового фрезерования торцевой фрезой  $IT_2 = IT_{\text{дет}}$  (см. табл. 7.3, 7.4). Чистовой обработке должно предшествовать черновое фрезерование, которое позволяет обеспечить точность размера  $IT_1 = 0,6$  мм в пределах  $\pm 0,3$ . Таким образом, требуемое уточнение на данной операции составляет

$$\varepsilon_m = \frac{IT_{\text{заг}}}{IT_{\text{дет}}} = \frac{1,4}{0,5} = 2,8.$$

Уточнение при чистовом фрезеровании:

$$\varepsilon_2 = \frac{IT_2}{IT_{\text{дет}}} = \frac{0,6}{0,5} = 1,2.$$

Уточнение при черновом фрезеровании:

$$\varepsilon_1 = \frac{IT_{\text{заг}}}{IT_1} = \frac{1,4}{0,6} = 2,33.$$

В результате имеем  $\varepsilon_0 = \varepsilon_1 \cdot \varepsilon_2 = 2,33 \cdot 1,2 \geq \varepsilon_{T_0}$ .

Расчет наименьшего припуска на первом и втором переходах выполняем согласно (7.6).

Из табл. 7.3 находим составляющие для  $Z_{\min 2}$  (предшествовала черновая обработка):  $Ra$  12,5 мкм или  $Rz$  50 мкм (0,05 мм),  $h = 100$  мкм (0,1 мм).

Погрешность формы и расположения  $\Delta$  принимаем как половину допуска на межпереходный размер  $IT_2 = 0,6$  мм:

$$\Delta = 0,5 \cdot IT_2 = 0,5 \cdot 0,6 = 0,3 \text{ мм.}$$

Погрешность установки  $\varepsilon_2 = 0$ , так как чистовое и черновое фрезерование выполняется с одной установки без перезакрепления заготовки. В результате имеем:

$$Z_{\min 2} = 0,05 + 0,1 + 0,3 = 0,45.$$

Находим составляющие минимального припуска  $Z_{\min 1}$  для первого перехода. Значение высоты микронеровностей  $Rz\ 300$  мкм (0,3 мм) и дефекта поверхностного слоя  $h = 200$  мкм (0,2 мм) определяем по табл. 7.1. При наличии таблиц ГОСТ 26645-85 эти значения можно определить как минимальный литейный припуск, предусмотренный ГОСТом для устранения неровностей и дефектов литой поверхности. Для пятого ряда припусков имеем  $(Rz+h) = 0,5$  мм.

Погрешность формы и расположения поверхности была найдена из табл. 7.5 как удельное коробление  $\Delta_{\Sigma} = \Delta_{уд} \cdot L = 2,5 \cdot 300 = 700$  мкм (0,7 мм).

Погрешность установки  $\varepsilon_z$ , формируемая в направлении установочной базы, рассчитывается по формуле (7.30). Параметр смещения  $C_y^{(уст)}$  получаем по формуле (7.33):

$$C_y^{(уст)} = 0,5 \cdot h = 0,5 \cdot 0,7 = 0,35.$$

Параметры поворота находим согласно (7.36), (7.37) с учетом  $L_x = 250$ ,  $L_y = 300$ :

$$\lambda_y = \frac{0,7}{4 \cdot 300} = \frac{0,175}{300}; \quad \beta_y = \frac{0,7}{4 \cdot 250} = \frac{0,175}{250}.$$

В результате согласно (7.30) погрешность установки  $\varepsilon = \varepsilon_z$  составит:

$$\varepsilon_z = 0,35 + \frac{0,175}{300} 300 + \frac{0,175}{250} 250 = 0,7.$$

Таким образом, минимальный припуск:

$$Z_{\min 1} = 0,5 + 0,7 + 0,7 = 1,9 \text{ мм.}$$

Значения максимальных припусков находим согласно (7.14) с учетом

$$IT_{\text{заг}} = 1,4; IT_1 = 0,6; \quad IT_2 = IT_{\text{дет}} = 0,5;$$

$$Z_{\max 2} = 0,45 + 0,5 + 0,6 = 1,55 \text{ мм}; Z_{\max 1} = 1,9 + 0,6 + 1,4 = 3,9 \text{ мм.}$$

Номинальные припуски находим согласно (7.17) с учетом принятых выше предельных отклонений размеров заготовки  $Z_1^{\pm 0,7}$ , детали  $D_1^{\pm 0,25}$ , первого перехода  $D_{1п}^{\pm 0,3}$ :

$$Z_{н2} = 0,45 + 0,3 + 0,25 = 1 \text{ мм}; \quad Z_{н1} = 1,9 + 0,7 + 0,3 = 2,9 \text{ мм.}$$

В результате общий припуск  $Z_0$  на фрезерование плоскости основания составляет:

$$Z_0 = Z_{н1} + Z_{н2} = 2,9 + 1 = 3,9 \text{ мм.}$$

Окончательно межпереходный размер  $D_{1п}^{\pm 0,3}$  и размер заготовки  $Z_1$  рассчитываем согласно (7.19), (7.20):

$$D_1 = 30^{\pm 0,25};$$

$$D_{1п} = D_1 + Z_{н2} = 30 + 1 = 31^{\pm 0,3};$$

$$Z_1 = D_1 + Z_{н2} + Z_{н1} = 30 + 1 + 2,9 = 33,9 \approx 34^{\pm 0,7}.$$

На второй операции заготовка базируется в координатный угол по плоскости основания и боковым поверхностям (см. рис. 7.7, з), которые были получены на первой операции. Вначале выполняют обработку верхней плоскости, а затем обработку главного отверстия. При этом получают линейные размеры  $D_3 = 300^{\pm 0,15}$ ;  $D_2 = 200^{\pm 0,1}$ ;  $B_2 = 150^{\pm 0,1}$  и отверстие  $\Phi 50H7$ .

### ***Расчет припусков и операционных размеров на верхнюю плоскость корпуса***

В результате обработки верхней плоскости необходимо обеспечить шероховатость поверхности  $Ra 3,2$  мкм и выдержать размер по высоте корпуса  $D_3 = 300^{\pm 0,15}$  мм. Для выявления необходимого количества переходов и расчета припусков следует оценить получаемую точность операционного размера  $D_{3п}$ , который определяет высоту заготовки после выполнения 1-й операции. Размер  $D_{3п}$  представляют как замыкающее звено и выявляют технологическую размерную цепь (7.67), которая его определяет (рис. 7.7, ж). Предельные отклонения размера  $D_{3п}$  находят согласно (7.68), (7.69):

$$\Delta_{D_{3п}}^B = 0,3 + 1,2 - (-0,7) = 2,2; \Delta_{D_{3п}}^H = -0,3 + (-1,2) - 0,7 = -2,2.$$

Таким образом, допуск на получаемый операционный размер  $D_{3п}$ , определяющий высоту корпуса, поступающего для последующей обработки на операцию 2, составляет:  $IT_{D_{3п}} = 2,2 - (-2,2) = 4,4$  мм.

Находим требуемое уточнение при обработке верхней плоскости корпуса:

$$\varepsilon_m = \frac{IT_{D_{3п}}}{IT_{D_3}} = \frac{4,4}{0,3} = 14,66.$$

Окончательную точность размера  $IT_{D_3} = 0,3$  по высоте корпуса можно обеспечить путем чистового фрезерования торцевой фрезой. Однако чистовому фрезерованию должно предшествовать получистовое и черновое фрезерование, на которых согласно табл. 7.3 достигают точность  $IT_2 = 0,6 (\pm 0,3)$  и  $IT_1 = 1,3 (\pm 0,65)$ . Уточнения на этих переходах соответственно составят:

$$\varepsilon_3 = \frac{IT_2}{IT_{D_3}} = \frac{0,6}{0,3} = 2; \varepsilon_2 = \frac{IT_1}{IT_2} = \frac{1,3}{0,6} = 2,17; \varepsilon_1 = \frac{IT_{3з}}{IT_1} = \frac{4,4}{1,3} = 3,38,$$

а общее уточнение будет равно

$$\varepsilon_o = \varepsilon_1 \cdot \varepsilon_2 \cdot \varepsilon_3 = 3,38 \cdot 2,17 \cdot 2 \geq \varepsilon_m = 14,66.$$

Расчет минимального припуска для чистового, получистового и чернового фрезерования выполняем по формуле (7.6). Из табл. 7.3, 7.1 находим составляющие припуска: для  $Z_{\min 3}$  Ra 5 мкм или Rz 20 мкм (0,02 мм),  $h = 30$  мкм (0,03 мм); для  $Z_{\min 2}$  Ra 12,5 мкм или Rz 50 мкм (0,05 мм),  $h = 100$  мкм (0,1 мм); для  $Z_{\min 1}$  Rz 300 мкм (0,3 мм),  $h = 200$  мкм (0,2 мм).

Отклонения формы и расположения при фрезеровании чистовом и получистовом соответственно:

$$\Delta_\Sigma = 0,5 \cdot IT_2 = 0,5 \cdot 0,6 = 0,3 \text{ мм};$$

$$\Delta_\Sigma = 0,5 \cdot IT_1 = 0,5 \cdot 1,3 = 0,65 \text{ мм},$$

где  $IT_2$  и  $IT_1$  – допуски на межпереходные размеры.

Фрезерование осуществляется с одной установки, поэтому принимаем на втором и третьем переходах  $\varepsilon = 0$ . В результате получим:

$$Z_{\min 3} = 0,02 + 0,03 + 0,3 = 0,35 \text{ мм}; \quad Z_{\min 2} = 0,05 + 0,1 + 0,65 = 0,8 \text{ мм}.$$

Находим составляющие минимального припуска  $Z_{\min 1}$  для первого перехода. Значение высоты микронеровностей Rz 300 мкм (0,3 мм) и дефекта поверхностного слоя  $h = 200$  мкм (0,2 мм) определяем по табл. 7.1.

Погрешность формы и расположения поверхности находим по табл. 7.5 как удельное коробление  $\Delta_\Sigma = \Delta_{\text{уд}} \cdot L = 2,5 \cdot 300 = 750$  мкм (0,750 мм).

Погрешность установки  $\varepsilon_z$ , формируемая в направлении размера, получаемого от установочной базы, рассчитывается по формуле (7.30). Параметр смещения  $C_y^{(\text{уст})}$  получаем по формуле (7.33):

$$C_y^{(\text{уст})} = 0,5 \cdot h = 0,5 \cdot 0,4 = 0,2,$$

учитывая, что корпус базируется на поверхности, полученной чистовым фрезерованием, для которой погрешность формы  $h = 0,4$  мм (см. табл. 7.3).

Параметры поворота находим согласно (7.36), (7.37) с учетом  $L_x = 250$ ,  $L_y = 300$ :

$$\lambda_y = \frac{0,4}{4 \cdot 300} = \frac{0,1}{300}; \quad \beta_y = \frac{0,4}{4 \cdot 250} = \frac{0,1}{250}.$$

В результате согласно (7.30) погрешность установки  $\varepsilon = \varepsilon_z$  составит

$$\varepsilon_z = 0,2 + \frac{0,1}{300} 300 + \frac{0,1}{250} 250 = 0,4.$$

Тогда наименьший припуск

$$Z_{\min 1} = 0,3 + 0,2 + 0,75 + 0,4 = 1,65 \text{ мм}.$$

Наибольшие припуски на каждом из переходов определяем по (7.14):

- $Z_{\max 3} = 0,35 + 0,6 + 0,3 = 1,25$  мм;
- $Z_{\max 2} = 0,8 + 1,3 + 0,6 = 2,7$  мм;
- $Z_{\max 1} = 1,65 + 4,4 + 1,3 = 7,35$  мм.

Номинальные припуски рассчитываем согласно (7.17):

- $Z_{н3} = 0,35 + 0,3 + 0,15 = 0,8$ ;  $Z_{н2} = 0,8 + 0,65 + 0,3 = 1,75$ ;
- $Z_{н1} = 1,65 + 2,2 + 0,65 = 4,5$ .

Окончательно межпереходные размеры рассчитываем по (7.19):

- $A_3 = D_3 = 300^{±0,15}$  мм; (требуемый размер детали)
- $A_2 = D_3 + Z_{н3} = 300 + 0,8 = 300,8$ . Округляем до  $301^{±0,3}$  мм;
- $A_1 = D_3 + Z_{н3} + Z_{н2} = 300 + 0,8 + 1,75 = 302,55$ . Округляем до  $303^{±0,65}$  мм;
- $D_{3П} = D_3 + Z_{н3} + Z_{н2} + Z_{н1} = 300 + 0,8 + 1,75 + 4,5 = 307,5$ . Округляем до  $308^{±2,2}$  мм.

Общий припуск  $Z_0$  на обработку верхней плоскости корпуса составит

$$Z_0 = Z_{н1} + Z_{н2} + Z_{н3} = 4,5 + 1,75 + 0,8 = 7,05 \approx 7 \text{ мм.}$$

Таким образом, размер заготовки  $Z_3$  по высоте корпуса, определяемый согласно (7.58), составит:

$$Z_3 = 300 + 3,6 + 7,05 = 310,65 \approx 311^{±1,2} \text{ мм.}$$

Размер заготовки  $Z_2$ , определяющий расстояние от оси пролитого отверстия до плоскости основания, находим по формуле (7.63):

$$Z_2 = 200 + 3,6 = 203,6 \text{ мм и округляем до } 204^{±1,1} \text{ мм.}$$

### ***Расчет припусков и межпереходных размеров на отверстие 50H7***

Обработку отверстия выполняем на многоцелевом станке за одну установку. В результате обработки необходимо обеспечить точность  $50^{+0,025}$  ( $IT_{д} = 0,025$  мм) и шероховатость поверхности  $Ra$  0,32 мкм. По табл. [22], определяющим допуски на размеры отливок, находим для 8-го класса размерной точности отливки допуск  $IT_{заг} = 1,2$  мм на диаметр пролитого отверстия и назначаем предельные отклонения диаметра черного отверстия  $\Phi \pm 0,6$  мм. Таким образом, в результате обработки необходимо обеспечить требуемое уточнение по диаметру отверстия:

$$\varepsilon_m = \frac{IT_{заг}}{IT_{дет}} = \frac{1,2}{0,025} = 48.$$

Окончательную точность отверстия можно обеспечить путем точного развертывания (см. табл. 7.2), которому должна предшествовать чистовая расточка с точностью  $IT_3 = 0,05$  мм. В свою очередь, до этого должны быть выполнены переходы: черновая расточка  $IT_2 = 0,16$  мм и зенкерование  $IT_1 = 0,3$  мм (см. табл. 7.2).

При данном сочетании технологических переходов достигают уточнения:

– при разворачивании при чистовой расточке

$$\varepsilon_4 = \frac{IT_3}{IT_{дет}} = \frac{0,05}{0,025} = 2; \quad \varepsilon_3 = \frac{IT_2}{IT_3} = \frac{0,16}{0,05} = 3,2;$$

– при предварительной расточке при зенкерованием

$$\varepsilon_2 = \frac{IT_1}{IT_2} = \frac{0,3}{0,16} = 1,88; \quad \varepsilon_1 = \frac{IT_{заг}}{IT_1} = \frac{1,2}{0,3} = 4.$$

Назначенные переходы обеспечивают достижение требуемой точности отверстия:

$$\varepsilon_0 = \varepsilon_1 \cdot \varepsilon_2 \cdot \varepsilon_3 \cdot \varepsilon_4 = 4 \cdot 1,88 \cdot 3,2 \cdot 2 \geq \varepsilon_m = 48.$$

Минимальные припуски для каждого из выбранных переходов рассчитываем по формуле (7.8). При этом значения  $Rz$  и  $h$  берем из табл. 7.2, а погрешность геометрической формы отверстия (отклонения от круглости и цилиндричности) находим как половину допуска на диаметральный размер соответствующего технологического перехода. Так как обработку выполняют с одной установки, то для второго, третьего и четвертого переходов значение  $\varepsilon = 0$ :

$$Z_{\min 4} = 2 \cdot (0,02 + 0,02 + 0,5 \cdot 0,04) = 0,12 \text{ мм};$$

$$Z_{\min 3} = 2 \cdot (0,1 + 0,1 + 0,5 \cdot 0,16) = 0,56 \text{ мм};$$

$$Z_{\min 2} = 2 \cdot (0,24 + 0,24 + 0,5 \cdot 0,3) = 1,26 \text{ мм}.$$

Особенность расчета имеет место при определении наименьшего припуска  $Z_{\min 1}$  на первом переходе (зенкерование отверстия). По таблицам точности отливок, приводимым в [22], находим для пятого ряда припусков суммарное значение  $(Rz + h) = 0,5$  мм, как минимальный литейный припуск. Значения  $Rz$  250 (0,25 мм) и  $h = 250$  мкм (0,25 мм) можно определить по табл. 7.1. Допуск формы и расположения  $\Delta_\Sigma$  берем из таблиц в справочниках [8, 22, 25] для отливки со степенью коробления 5 и длине нормируемого участка 250 мм, то есть  $\Delta_\Sigma = 0,64$  мм. Погрешность формы и расположения поверхности можно определить также по табл. 7.5 как удельное коробление  $\Delta_\Sigma = \Delta_{уд} \cdot L = 2,5 \cdot 250 = 625$  мкм (0,625 мм).

Погрешность установки в данном случае проявляется как смещение центра обрабатываемого отверстия заготовки в двух координатных направлениях  $\varepsilon_z$  и  $\varepsilon_y$ , которые можно определить согласно (7.30), (7.31):

$$\varepsilon_z^{(\text{уст})} = c_y^{(\text{уст})} + \lambda_y^{(\text{уст})} \cdot y + \beta_y^{(\text{уст})}; \quad \varepsilon_z^{(\text{нан})} = b_y^{(\text{нан})} + \lambda_y^{(\text{уст})} \cdot y + \gamma_y^{(\text{нан})}.$$

Составляющие  $c_y^{(\text{уст})}$ ,  $\lambda_y^{(\text{уст})}$ ,  $\beta_y^{(\text{уст})}$  были определены ранее при расчете погрешности установки для случая обработки верхней плоскости корпуса.

Зная координаты отверстия  $X = 250$  мм,  $Y = 150$  мм, получим:

$$\varepsilon_z = 0,2 + \frac{0,1}{300} \cdot 150 + \frac{0,1}{250} \cdot 250 = 0,35.$$

Параметр смещения  $b_y^{(\text{нан})}$  определяем по формуле (7.41), в которую подставляем допуск  $IT = 0,6$  мм на размер  $150^{\pm 0,3}$ , полученный на первой операции (см. рис. 7.7, в), а также отклонение от перпендикулярности  $\Delta v = 0,5 \cdot IT / 35$ . В результате имеем

$$b_y^{(\text{нан})} = 0,5 \cdot \sqrt{(0,6 \cdot 0,6)^2 + \left(\frac{0,5 \cdot 0,6}{35} \cdot 35\right)^2} = 0,23.$$

Параметр поворота согласно (7.42) составит

$$\gamma_y^{(\text{нан})} = \frac{0,15 \cdot IT}{L} = \frac{0,15 \cdot 0,6}{250} = \frac{0,09}{250}.$$

В результате  $\varepsilon_y$ , рассчитываемое по (7.31), при  $Z = 300$  составит:

$$\varepsilon_y = 0,23 + \frac{0,01}{300} \cdot 300 + \frac{0,09}{250} \cdot 250 = 0,33.$$

Результирующее отклонение центра отверстия, обусловленное погрешностью установки заготовки, составит

$$\varepsilon = \sqrt{\varepsilon_z^2 + \varepsilon_y^2} = \sqrt{0,35^2 + 0,33^2} = 0,48.$$

Таким образом, согласно (7.8) наименьший припуск  $Z_{\text{min1}}$  на первом переходе зенкерования отверстия составит:

$$2 \cdot Z_{\text{min1}} = 2 \cdot (0,5 + \sqrt{0,625^2 + 0,48^2}) = 2,58.$$

При расчете наименьшего припуска на первом переходе обработки отверстия  $Z_{\text{min1}}$  необходимо введение дополнительной составляющей  $A_{E_{\Delta}}^{\text{max}}$ , определяемой по формуле (7.76), которая учитывает возможное смещение оси отверстия заготовки относительно требуемого положения оси отверстия детали. Для этого необходимо выявить две технологические размерные цепи  $A_{\Delta}$  и  $B_{\Delta}$  (см. рис. 7.7, в, з) и найти предельные отклонения замыкающих звеньев (7.73), (7.74):

– для размерной цепи  $A_{\Delta}$   
 $\Delta_{A_{\Delta}}^B = (\Delta_{3_2}^B + \Delta_{D_1}^B) - (\Delta_{3_1}^H + \Delta_{D_2}^H)$ ;  $\Delta_{A_{\Delta}}^H = (\Delta_{3_2}^H + \Delta_{D_1}^H) - (\Delta_{3_1}^B + \Delta_{D_2}^B)$ ;

$$\Delta_{A_{\Delta}}^B = (1,1 + 0,3) - (-0,7 - 0,15) = 2,25;$$

$$\Delta_{A_{\Delta}}^H = (-1,1 - 0,3) - (0,7 + 0,15) = -2,25.$$

– для размерной цепи  $B_{\Delta}$

$$\Delta_{B_{\Delta}}^B = \Delta_{B_2}^B - \Delta_{B_1}^H = 0,3 - (-0,1) = 0,4 \quad \Delta_{B_{\Delta}}^H = \Delta_{B_2}^H - \Delta_{B_1}^B = 0,3 - (-0,1) = -0,4.$$

В результате согласно (7.76) получим

$$\Delta_{E_{\Delta}}^{\max} = \sqrt{2,25^2 + 0,4^2} = 2,28.$$

Окончательно минимальный припуск на первом переходе составит

$$2 \cdot Z_{\min 1}^* = 2 \cdot \sqrt{Z_{\min 1}^2 + (\Delta_{E_{\Delta}}^{\max})^2} = 2 \cdot \sqrt{1,29^2 + 2,28^2} = 5,23$$

Максимальные припуски на переходах согласно (7.15) составят

$$2 \cdot Z_{\max 4} = 0,12 + 0,025 + 0,05 = 0,195;$$

$$2 \cdot Z_{\max 2} = 1,26 + 0,16 + 0,3 = 1,72;$$

$$2 \cdot Z_{\max 3} = 0,56 + 0,05 + 0,16 = 0,77;$$

$$2 \cdot Z_{\max 1}^* = 5,23 + 0,3 + 1,2 = 6,73.$$

Номинальные припуски находим по формуле (7.18) с учетом принятых предельных отклонений межпереходных размеров:

$$D_4 = D_{\det} = 50_{0}^{0,025}; D_3^{+0,05}; D_2^{+0,16}; D_1^{+0,3}; D_{\text{заг}}^{\pm 0,6};$$

соответственно равны:

$$2 \cdot Z_4 = 0,12 + 0,025 + 0 = 0,145; \quad 2 \cdot Z_3 = 0,56 + 0,05 + 0 = 0,61;$$

$$2 \cdot Z_2 = 1,26 + 0,16 + 0 = 1,42; \quad 2 \cdot Z_1^* = 5,23 + 0,3 + 0,6 = 5,83$$

Межпереходные размеры согласно (7.22) составят:

– для развертывания

$$D_4 = D_{\det} = 50_{0}^{0,025};$$

– для чистовой расточки

$$D_3 = D_{\det} - 2Z_4 = 50 - 0,145 = 49,85_{0}^{0,05}$$

– для черновой расточки

$$D_2 = D_{\det} - 2Z_4 - 2Z_3 = 50 - 0,145 - 0,61 = 49,25_{0}^{0,16};$$

– для зенкерования

$$\begin{aligned} D_1 &= D_{\det} - 2Z_4 - 2Z_3 - 2Z_2 = \\ &= 50 - 0,145 - 0,61 - 1,42 - 5,83 = 40,95 \approx 41 \pm 0,6. \end{aligned}$$

Общий припуск на обработку отверстия будет равен

$$2 \cdot Z_o = 2 \cdot Z_4 + 2 \cdot Z_3 + 2 \cdot Z_2 + 2 \cdot Z_1^* = 0,145 + 0,61 + 1,42 + 5,83 = 7,98 \approx 8,$$

а диаметр отверстия у заготовки согласно (7.24) составит

$$D_{\text{заг}} = D_{\text{дет}} - 2 \cdot Z_o = 50 - 8 = 42 \text{ мм.}$$

Проверим правильность расчета припуска для верхней плоскости корпуса, используя для этой цели расчетные формулы, приведенные в первой части раздела 7.4. Верхнюю плоскость корпуса обрабатывают фрезерованием на второй операции (см. рис. 7.7) в размер  $A_1 = 303^{\pm 0,65}$  мм; заготовкой является корпус, у которого на первой операции обработана плоскость основания и получен операционный размер  $D_{3П} = 308^{\pm 2,2}$  мм.

Рассчитанные припуски для первого прохода составляют  $Z_{\text{min1}} = 1,65$  мм,  $Z_{\text{max1}} = 7,35$  мм,  $Z_{\text{н1}} = 4,5$  мм.

Рассчитаем по формуле (7.57) формируемый на обрабатываемой поверхности в результате смены баз наименьший припуск  $Z_{\text{min}}^*$ :

$$Z_{\text{min}}^* = 4,5 - (2,2 + 0,65) = 1,65 \text{ мм.}$$

Определим по формуле (7.58) значение поправки  $\Delta_{\Sigma}$  в номинальные размеры звеньев технологической размерной цепи (7.67), внесение которой позволяет компенсировать уменьшение наименьшего припуска путем прибавления дополнительного металла  $Z_{\text{доп}}$ :

$$\Delta_{\Sigma} = Z_{\text{доп}} = Z_{\text{доп}} - Z_{\text{min1}} = 1,65 - 1,65 = 0.$$

Расчет показывает, что при  $\Delta_{\Sigma} = Z_{\text{доп}} = 0$  внесение поправки не требуется, рассчитанный с учетом смены баз  $Z_{\text{min1}} = Z_{\text{min}}^* = 1,65$  мм.

Рассчитаем по формуле (7.61), формируемый на обрабатываемой поверхности при смене баз наибольший припуск  $Z_{\text{max}}^*$ :

$$Z_{\text{max}}^* = 4,5 + (2,2 + 0,65) = 7,35 \text{ мм.}$$

Сравнение  $Z_{\text{max}}^*$  и  $Z_{\text{max1}}$  показывает, что  $Z_{\text{max}}^* = Z_{\text{max1}} = 7,35$  мм. Это означает правильность расчета  $Z_{\text{max1}}$ , при котором учтены колебания наибольшего припуска, обусловленные сменой технологических баз при обработке основания и верхней плоскости корпуса.

### Вопросы для самопроверки

1. Что следует понимать под понятием «припуск»?
2. Что такое получаемые межпереходные и операционные размеры?
3. С какой целью выполняют расчет припусков?
4. В чем заключается сущность двух методов установления припусков на механическую обработку – опытно-статистического и расчетно-аналитического?
5. Что следует понимать под понятиями односторонний припуск, двусторонний, симметричный и несимметричный?

6. В какой последовательности и по каким этапам выполняют расчет припусков расчетно-аналитическим методом?
7. Каким образом выявляют состав и количество технологических переходов (операций), необходимых для обработки данной поверхности?
8. Что такое наименьший припуск, из каких составляющих он состоит?
9. Что такое наибольший припуск, какие составляющие необходимо учитывать при его расчете?
10. Что такое номинальный припуск и как он рассчитывается?
11. Как рассчитывают операционные (межпереходные) размеры?
12. Как рассчитывают размеры заготовки?
13. В какой последовательности выполняют расчет припусков и операционных (межпереходных) размеров – от детали к заготовке или наоборот?
14. Как сказываются на рассчитываемых припусках отклонения обрабатываемых поверхностей, которые возникают при несовпадении выбираемых технологических баз с конструкторскими?
15. Каким образом следует компенсировать отклонения припусков, которые обусловлены несовпадением технологических и конструкторских баз?
16. Как рассчитать номинальный припуск  $Z_n^*$ , образуемый на обрабатываемой поверхности при несовпадении выбираемых технологических баз с конструкторскими?
17. Как рассчитать наименьший припуск  $Z_{\min}^*$ , формируемый на обрабатываемой поверхности при несовпадении выбираемых технологических баз с конструкторскими?
18. Как рассчитать наибольший припуск  $Z_{\max}^*$ , возникающий на обрабатываемой поверхности при несовпадении выбираемых технологических баз с конструкторскими?
19. Какими методами представляется возможным в общем случае рассчитать отклонения обрабатываемой поверхности, обусловленные погрешностью установки заготовки?

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Адаптивное управление технологическими процессами / Ю.М. Соломенцев [и др.]. – М. : Машиностроение, 1980. – 536 с.
2. Активный контроль размеров / С.С. Волосов [и др.] ; под ред. С.С. Волосова. – М. : Машиностроение, 1984. – 224 с.
3. *Аршинов, В.А.* Резание металлов и режущий инструмент / В.А. Аршинов, Г.А. Алексеев. – М. : Машиностроение, 1976. – 440 с.
4. ГОСТ 21495 – 76. Базирование и базы в машиностроении. Термины и определения. – М. : Изд-во стандартов, 1982. – 35 с.
5. *Балакшин, Б.С.* Основы технологии машиностроения / Б.С. Балакшин. – М. : Машиностроение, 1969. – 559 с.
6. *Он же.* Теория и практика технологии машиностроения. В 2 кн. / Б.С. Балакшин. – М. : Машиностроение, 1982. – Кн. 1. – 283 с. – Кн. 2. – 268 с.
7. *Гусев, А.А.* Технологическая оснастка (расчет и проектирование) / А.А. Гусев, И.А. Гусева. – М. : ИЦ МГТУ «Станкин», Янус-К. – 372 с.
8. Допуски и посадки: справ. в 2-х ч. / В.Д. Мягков [и др.]. – Л. : Машиностроение, 1982. – Ч. 1. – 543 с. – Ч. 2. – 448 с.
9. *Лахтин, Ю.М.* Металловедение и термическая обработка металлов / Ю.М. Лахтин. – М. : Металлургия, 1985. – 510 с.
10. Машиностроение: энциклопедия. Том III-3. Технология изготовления деталей машин / ред.-сост. А.Г. Суслов. – М.: Машиностроение, 2000. – 839 с.
11. Машиностроение: энциклопедия. Том III-5. Технология сборки в машиностроении / А.А. Гусев [и др.]; под общ. ред. Ю.М. Соломенцева. – М. : Машиностроение, 1986. – 574 с.
12. Металлорежущие станки: учеб. для вузов / В.Э. Пуш [и др.]; под ред. В.Э. Пуш. – М. : Машиностроение, 1986 – 574 с.
13. *Митин, Г.П.* Микроконтроллеры в системах автоматизации / Г.П. Митин, О.В. Хазанова. – М. : МГТУ «Станкин», 2001. – 108 с. – (сер. книг «Технология оборудование и автоматизация машиностроительных производств»).

14. *Митрофанов, С.П.* Групповая технология машиностроительного производства. В 2 т. / С.П. Митрофанов. – Л. : Машиностроение, 1983. – 786 с.
15. *Мнацаканян, В.У.* Технологические основы обеспечения точности и восстановления работоспособности деталей и узлов текстильных машин: монография / В.У. Мнацаканян. – М. : Янус-К, 2006. – 143 с.
16. *Мнацаканян, В.У.* Нарезание зубчатых колес: учеб. пособие для вузов / В.У. Мнацаканян, А.П. Гаевой, П.Ф. Бойко. – Старый Оскол : ООО ТНТ, 2006. – 94 с.
17. *Новиков, М.П.* Основы технологии сборки машин и механизмов / М.П. Новиков. – М. : Машиностроение, 1980. – 592 с.
18. Проектирование технологии: учеб. для машиностроительных специальностей вузов / И.М. Баранчукова [и др.]; под общ. ред. Ю.М. Соломенцева. – М. : Машиностроение, 1990. – 415 с.
19. Проектирование технологии автоматизированного машиностроения / под ред. Ю.М. Соломенцева. – М. : Высшая школа, 1999. – 416 с.
20. Производство зубчатых колес: справочник / С.Н. Калашников [и др.]; под ред. Б.А. Тайца. – М. : Машиностроение, 1975. – 728 с.
21. *Радкевич, Я.М.* Метрология, стандартизация и сертификация: учеб. для вузов / Я.М. Радкевич, А.Г. Схиртладзе, Б.И. Лактионов. – М. : Высшая школа, 2007. – 791с
22. Расчет припусков и межпереходных размеров в машиностроении / Я.М. Радкевич [и др.]; под ред. В.А. Тимирязева. – М. : Высшая школа, 2007. – 272с.
23. *Сосонкин, В.Л.* Программное управление технологическим оборудованием: учеб. для вузов / В.Л. Сосонкин. – М. : Машиностроение, 1991. – 509 с.
24. Справочник конструктора-инструментальщика / В.И. Баранчиков, Г.В. Боровский, В.А. Гречишников; под общ. ред. В.И. Баранчикова. – М. : Машиностроение, 1994. – 558 с.
25. Справочник технолога-машиностроителя. В 2 т. / под ред. А.Г. Косиловой и Р.К. Мещерякова. – М. : Машиностроение, 1986. – Т. 1. – 656 с. – Т. 2. – 496 с.
26. *Суслов, А.Г.* Технология машиностроения: учеб. для студентов машиностроительных специальностей вузов / А.Г. Суслов. – М. : Машиностроение, 2004. – 397 с.

27. *Схиртладзе, А.Г.* Технологические процессы в машиностроении: учеб. для вузов / А.Г. Схиртладзе. – М. : Высшая школа, 2007. – 416 с.
28. Технология автомобилестроения: учеб. для вузов / А.Л. Карунин, Е.Н. Бузник, О.А. Дащенко; под общ. ред. О.А. Дащенко. – М. : Академический проект, 2005. – 622 с.
29. Технологичность конструкций изделий: справочник / под ред. Ю.Д. Амирова. – М. : Машиностроение, 1985. – 368 с.
30. Технология машиностроения (специальная часть): учеб. для машиностроительных специальностей вузов / А.А. Гусев [и др.]. – М. : Машиностроение, 1986. – 480 с.
31. Технология машиностроения: учеб. для вузов / Л.В. Лебедев [и др.]. – М. : Академия, 2006. – 487 с.
32. Технология машиностроения: учеб. для вузов. / под ред. А.В. Мухина, А.М. Дальского, Г.Н. Мельникова. – М. : МВТУ им. Н.Э. Баумана, 1998. – Т. 1 – 360 с. – Т. 2 – 350 с.
33. *Черпаков, Б.И.* Автоматизация и механизация производства / Б.И. Черпаков, Л.И. Вереина. – М. : Академия, 2004. – 375 с.
34. *Шемелин, В.К.* Управление системами и процессами: учеб. для вузов / В.К. Шемелин, О.В. Хазанова. – Старый Оскол : ООО ТНТ, 2007. – 320 с.
35. *Шишмарев, В.Ю.* Автоматизация производственных процессов в машиностроении: учеб. для вузов / В.Ю. Шишмарев. – М. : Академия, 2007. – 364 с.

*Учебное издание*

МНАЦАКАНЯН Виктория Умедовна  
МОРОЗОВ Валентин Васильевич  
СХИРТЛАДЗЕ Александр Григорьевич  
и др.

ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИИ  
МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО  
ПРОИЗВОДСТВА

Учебник  
В двух частях  
Часть 1

Подписано в печать 23.03.11.  
Формат 60x84/16. Усл. печ. л. 16,04. Тираж 500 экз.

Заказ

Издательство

Владимирского государственного университета.  
600000, Владимир, ул. Горького, 87