

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С.П. КОРОЛЕВА»  
(Национальный исследовательский университет  
СГАУ)

**ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТОЧНОСТИ  
ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ  
ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ  
ДЕТАЛЕЙ ГТД**

*учебное пособие*

САМАРА

2010

УДК 621.45.0.002.2 (075.8)

ББК 39.55

Д 30

**Составитель: Ф.И. Демин**

***Обеспечение точности геометрических параметров при изготовлении деталей ГТД***: учебное пособие / сост.: [Ф.И. Демин] – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2010. – 84 с.

В учебном пособии рассмотрены теоретические основы точности в авиационном двигателестроении. Представлена теория сложных размерных связей в изделиях и технологических процессах. Рассмотрены методы достижения точности при изготовлении заготовок. Приведены и проанализированы технологические схемы точности при обработке различных поверхностей заготовок. В учебном пособии приведен алгоритм решения сложных пространственных цепей. Дана лабораторная работа по анализу размерных связей при изготовлении трубопроводов. Эта работа направлена на освоение курса «Технология производства двигателей летательных аппаратов». Изучение данного пособия способствует изучению основных разделов курса: теоретические основы технологических процессов; обработка сложных поверхностей; технология изготовления деталей ГТД. В учебном пособии изложены элементы расчётов основных параметров технологических процессов и отдельных операций.

Учебное пособие предназначено для студентов обучающихся по специальности: 160700.68 «Двигатели летательных аппаратов», изучающих курсы «Технология производства АД и ЭУ», «Технология машиностроения», «Интегрированные информационные технологии в авиадвигателестроении», «Инновационные производственные технологии в двигателестроении».

Методические указания разработаны на кафедре производства двигателей летательных аппаратов.

© Самарский государственный  
аэрокосмический университет, 2010

# СОДЕРЖАНИЕ

<b>Введение</b> .....	4
<b>1 Основные показатели качества деталей</b> .....	10
1.1 Параметры точности поверхностей деталей.....	17
1.2 Параметры качества материала детали.....	21
1.3 Параметры поверхностного слоя.....	25
<b>2 Классификация поверхностей деталей</b> .....	27
2.1 Конструкторские поверхности.....	27
2.2 Рабочие поверхности.....	32
2.3 Свободные поверхности.....	33
<b>3 Расчеты точности геометрических систем и моделей</b> .....	33
3.1 Структурно-логическая схема обеспечения показателей качества.....	33
3.2 Классификация размерных связей систем и моделей.....	38
3.3 Определение областей рассеивания составляющих звеньев размерных цепей.....	46
3.4 Образование области рассеивания в размерных связях деталей, изделий и технологических процессах.....	50
3.5 Определение граничных точек областей рассеивания составляющих векторов.....	57
<b>4 Обработка заготовок на настроенном оборудовании</b> .....	63
4.1 Методы достижения точности при обработке заготовок.....	63
4.2 Технологические схемы точности при обработке поверхностей заготовок.....	67
<b>5 Трубопроводы газотурбинных двигателей</b> .....	73
5.1 Виды трубопроводов.....	73
5.2 Процессы формирования профиля труб.....	75
5.3 Лабораторная работа.....	77

## ВВЕДЕНИЕ

Совершенствование конструкций авиационной и космической техники постоянно повышает требование к показателям качества изделий (ПКИ). Эти требования непосредственно влияют на технологические процессы изготовления и сборки отдельных деталей и сборочных единиц.

Используемое оборудование, оснастка и контрольно-измерительные устройства требуют постоянного совершенствования.

Применение в конструкциях изделий деталей из высокопрочных и термостойких материалов с заданными показателями качества поверхностей и создание различных покрытий малой толщины, требуют разработки новых методов изготовления. Это существенно изменяет технологические процессы изготовления, как отдельных элементов конструкции, так и всего изделия в целом.

Стабильность выполнения заданных показателей качества определяется физическими процессами, происходящими при изготовлении отдельных элементов деталей и различных поверхностей.

Современные процессы обработки деталей и сборочных единиц ориентированы на автоматический способ формирования качественных показателей во времени. Для использования автоматических или полуавтоматических методов обработки требуется весьма глубокая и тщательная подготовка всей технологической системы, участвующей в выполнении заданных параметров деталей.

Трудоемкость процессов и финансовые затраты при изготовлении деталей непосредственно зависят от стойкости и надежности применяемых методов достижения точности качественных параметров деталей, и всего изделия в целом.

Повышение требований к точности процессов изготовления связано с поиском новых приемов и решений по улучшению ПКИ.

Требование к точности геометрических, физико-механических, химических и других параметров должно учитывать явления, происходящие при изготовлении. Чем лучше будут познаны явления, происходящие при изготовлении, тем точнее и надежнее можно

обеспечить заданные параметры изделий. Разработка на-на технологических процессов производства ставят сложные задачи для изготовления изделий.

Если  $1 \text{ на-на}$  составляет  $10^9$  метра,

$1 \text{ м} = 1000 \text{ мм},$

$1 \text{ мм} = 1000 \text{ мкм},$

$1 \text{ мкм} = 1000 \text{ на-на}.$

То такие высокие требования к точности изготовления изделий, которые являются необходимыми для современной техники, представляют сложную задачу.

Эта задача должна решаться на основе теоретических и экспериментальных исследований. Данные исследования на передний план выдвигают вопросы разработки теории точности технологических процессов и использования ее в производстве.

Обеспечение геометрической точности параметров с использованием различных методов и средств оснащения, и созданием необходимых условий для производства позволяют изготавливать изделия различной точности.

При создании исходных заготовок невысокой точности (19–14 качества) используются процессы свободнойковки, обычной штамповки, литья в земляные формы и т. п. Эти процессы происходят на оборудовании нормальной точности при невысоких требованиях к температурному режиму в помещении где происходят эти процессы.

Повышение точности исходных заготовок с применением методов штамповки на горизонтально-ковачных машинах, использовании вальцовки, высокоскоростной штамповки, литья в металлические формы (кокили), требуют более точного оборудования, оснастки повышенной точности и других средств обеспечения. В этом случае увеличиваются требования к условиям выполнения данных работ. Возрастают требования к вибрационной защите оборудования, повышаются требования к температурному режиму в помещении и возрастают другие требования к производству. При данных условиях обеспечивается точность в пределах 14–10 качества.

Обеспечение точности (13–11 качества), при механической обработке, на металлорежущем оборудовании происходит также при невысоких требованиях к производству.

Повышение точности до 10–8 качества вызывают повышенные требования, при изготовлении деталей, более точного оборудования, использования предварительного шлифования; механической обработки заготовок с малыми припусками, и использование установочных приспособлений повышенной точности. В этом случае возрастают условия защиты оборудования и средств оснащения специальными устройствами.

Точность в пределах 7–5 качества требует весьма высоких показателей по защите оборудования и оснастки от вибрационных и температурных колебаний. Например, для установки расточного высоко точного оборудования или для установки хонинговальных станков требуются специальные виброгасители, специальный фундамент и различные средства оснащения.

Проведения доводочных работ высокой точности, когда требования находятся в пределах 4 и выше качества, используется уникальное оборудование с применением специальных защитных средств. Процессы обработки и сборки выполняются в термоконстантных лабораториях, где методы достижения точности выполняются в автоматическом режиме на настроенном оборудовании с дистанционным управлением.

Получение параметров точности в пределах нескольких долей микрона, является сложным технологическим процессом.

Так, например, в середине прошлого века была присуждена государственная премия, за разработку технологического комплекса по нарезке дифракционных решеток на стекле. Номинальное расстояние между трехгранными гребешками равнялось *1,2 микрона*, а допуск на расположение этих гребешков был равен *0,02 мкм*. Такая точность процесса, обеспечивалась в специальной лаборатории, с наличием высочайшей вибрационной защиты; колебание температуры в рабочем помещении составляло *0,02 °С*. Такие условия позволяли производить нарезку дифракционных решеток образцах размером *160×160 мм*.

При изготовлении микролазеров размеры, которых определяются высотой несколько микрон и диаметром  $0,5$  мкм используются уникальные технологические процессы. Задача, создания микролазеры с диаметром  $0,3$  мкм позволит передавать и обрабатывать информацию на порядок больше, при том же уровне потребляемой мощности.

Как изготавливаются такие микролазеры с хорошими рабочими характеристиками. Их изготовление стало возможным благодаря применению отработанных технологий. Например, технология, называемая эпитаксией создает образование тонких слоев материала из молекулярного пучка. Эта технология позволяет вырастить тело каждого лазера из полупроводниковых материалов, добавляемых по одному слою. Затем тысячи или миллионы отдельных лазеров одновременно «штампуются» с помощью глубокого вертикального травления, применяемого совместно с методами обычной фотолитографии. Идея эпитаксии молекулярным пучком проста. Полупроводниковый кристалл помещается в вакуум. Ряд контейнеров заполняется химическими элементами, нужными для нанесения требуемых полупроводниковых слоев на поверхность подложки, например индием, галлием, алюминием и мышьяком. Если отдельный контейнер нагревается до требуемой температуры, то содержащийся в нем элемент начинает испаряться и поток паров выходит из носика кипящего чайника. В результате образуется широкий поток молекул, которые распространяются в направлении полупроводникового кристалла. При необходимости каждый поток может быть перекрыт механической заслонкой. Толщина каждого слоя определяется временем, в течении которого заслонки остаются открытыми. Обычный лазер состоит более чем 500 отдельных слоев.

Показанные технологические процессы требуют создания уникальных установок и условий для производства.

Эти два примера показывают возможные пути по обеспечению параметров точности с высокими показателями.

Представленные пути разные и требуют, перед освоением, тщательных теоретических и экспериментальных исследований.

Решение задач производства для изделий высокой точности без раскрытия физической сущности происходящих процессов при изготовлении не смогут создавать и находить пути и способы изготовления.

В настоящий момент перед машиностроением и в частности перед авиа двигателестроением ставятся очень серьезные технологические задачи.

Решение таких задач без раскрытия сущности происходящих процессов и создания достоверной теории решения, как отдельных, так и общих задач точности чрезвычайно сложно.

В процессе проектирования, изготовления, сборки и эксплуатации машин и механизмов обеспечиваются основные его показатели качества: точность изделия, прочность и жесткость элементов конструкции, долговечность, надежность и стабильность работы изделия во времени.

Эти показатели во многом определяются качеством изготовления изделия.

Важным условием при создании машин и механизмов является обеспечение показателей точности на всех уровнях проектирования, изготовления и эксплуатации:

- точности исполнения геометрических параметров деталей, сборочных единиц и изделия в целом;
- точности физико-механических параметров элементов деталей;
- точности химических параметров изделия и среды, в которой оно эксплуатируется;
- точности эксплуатационных показателей изделия и других параметров.

Эти показатели обеспечивают стабильность характеристик прочности, жесткости и надежности конструкции изделия при различных допустимых режимах эксплуатации.

В представленной работе рассмотрены некоторые вопросы обеспечения точности геометрических параметров деталей и сборочных единиц в процессе проектирования, изготовления и сборки изделий в авиационном двигателестроении.



## ГЛАВА 1. ОСНОВНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ КАЧЕСТВА ДЕТАЛЕЙ.

Любую деталь можно представить, как совокупность геометрических, идеально точных объемов, имеющих цилиндрические, плоские, конические, эвольвентные и другие поверхности. При изготовлении деталей фактические контуры отличаются от идеальных в виду большого количества производственных факторов, влияющих на формирование форм и расположение поверхностей. Таким образом, в чертежах и технологических эскизах форму детали задают идеально точными номинальными поверхностями, плоскостями и различными профилями. Изготовленные детали имеют реальные поверхности и профили, которые отличаются от номинальных отклонениями форм и расположения, а также шероховатостью и волнистостью. Основные термины и определения характеристик точности установлены стандартами и единой системой допусков и посадок.

### **Реальная поверхность детали не совершенна.**

В партии изготовленных деталей имеет место рассеивание размеров поверхностей, расположения их относительно друг друга и отклонения геометрической формы этих поверхностей относительно номинальных значений.

Отклонения от геометрической правильности поверхности можно рассматривать на макро-, микро- и субмикроскопическом уровне.

Химический состав материала, из которого изготавливаются изделия, физико-механические показатели материала, состояние поверхностного слоя и другие качественные показатели имеют рассеивания в партии изготовленных деталей.

От точности выполнения качественных параметров деталей зависит ее работоспособность в изделии.

Точность исполнения заданных качественных показателей у детали является залогом надежной работы всего изделия в целом.

Точность геометрических параметров деталей является первой и важной характеристикой для качественной работы изделия.

Оптимальная точность геометрических параметров деталей позволяет осуществлять качественную сборку изделий, изготавливать заготовки в автоматическом и полуавтоматическом режиме, использовать прогрессивные методы обработки, оснастку, оборудование и другие средства производства.

Точность – основная характеристика машиностроения. Вопросы точности ставятся исходя из следующих основных положений:

1. требований, предъявляемых со стороны назначения и функционирования изделия;
2. требований, предъявляемых к обеспечению заданной точности при изготовлении изделия;
3. требований к точности контроля заданных параметров изделий;
4. требований к точности исполнения параметров в зависимости от вида производства (массовое автоматизированное, серийное, единичное) и т. д.

Наиболее общее понятие точности представляется в виде следующего определения:

**Точностью** называется степень соответствия реально существующего изделия некоторому идеально заданному разработчиком.

Это понятие относится к сравнению двух изделий, реальному и идеальному различие, между которыми обусловлено несовершенством процесса изготовления. Например, представляя конструкцию изделия, как набор различных видов поверхностей, отождествленных с некоторыми геометрическими образами можно говорить о соответствии реального и идеального изделия по следующим геометрическим характеристикам:

1. Точность размеров участков детали;
2. Точность формы, т. е. степени соответствия отдельных участков деталей или изделий тем геометрическим образам, с которыми они отождествляются;
3. Точностью взаимного расположения участков детали;

4. Шероховатостью поверхностей участков детали, т. е. степенью соответствия реальной поверхности идеальным геометрическим поверхностям.

Понятие точности также должны быть отнесены к характеристикам материала, по прочностным характеристикам этого материала, по состоянию поверхностного слоя и т.п.

В связи с несовершенством производства достигнуть идеального соответствия реального изделия, заданному значению **невозможно**.

Постоянные требования жизни ставят задачи по совершенствованию производства и уменьшению степени соответствия реальных и заданных (расчетных) характеристик точности изделия.

Допустимые несоответствия реальных и заданных изделий **юридически** устанавливаются разработчиком на основании действующих и вновь разрабатываемых норм точности и выбором экономически целесообразного производства этих изделий. При назначении допустимых отклонений от идеального образа появляется возможность сравнивать не два изделия, а множество изделий.

Эти условия создают возможность изготовления изделий с определенной точностью, и иметь в партии изготавливаемых изделий различные по тем или иным параметрам. Это различие характеризуется понятием – допустимое поле рассеивания размеров в пределах допуска на размер. Разброс действительных размеров не должен нарушать работоспособность изделий.

В процессе создания изделия обеспечиваются различные параметры качества. Количество этих параметров зависит от сложности конструкции; от служебного назначения и требований, которые предъявляются к работе изделия. Количество параметров, обеспечивающих качество изделия должно быть минимально необходимым и достаточным, чтобы изготовить и выполнить контроль этого изделия и входящих в него отдельных деталей и сборочных единиц.

При изготовлении невозможно обеспечить необходимые значения параметров с идеальной (нулевой) точностью, т. к. известно, что вероятность попадания в точку равна нулю. В связи с этим, для выполнения необходимых параметров деталей, сборочных единиц

и изделия в целом задаются в чертежах и операционных эскизах допуски.

**Допуск** равен разности наибольшего и наименьшего предельных размеров заданных разработчиком.

Допуск определяет юридические, заданные разработчиком значения параметров. Для назначения величин допусков используют действующие нормали и стандарты. При назначении величины допуска на отдельные параметры исходят из условий возможности изготовления и эксплуатации изделия. Назначение допуска и возможных отклонений от номинального параметра должно определять величину и направление этого отклонения. Величины отклонений и их направление должны учитывать физическую сущность происходящих процессов, как при эксплуатации готового изделия, так и в процессе изготовления и контроля его отдельных элементов. В этих случаях учитываются изменения характеристик изделия связанные с приработкой, износом и возможным выходом в зону недопустимых значений параметров этих характеристик.

Допустимые отклонения на заданные параметры влияют на качество работы изделия. Так, например, величина зазора между вершинами лопаток турбины или компрессора газотурбинного двигателя, непосредственно определяет основные показатели изделия: расход топлива, тягу двигателя и др. показатели. Данная величина зазора определяется суммой производственных погрешностей, которые возникли в процессе изготовления отдельных деталей и их сборки.

Биение зубчатого венца шестерни, зависит от качества исполнения отдельных деталей данной сборочной единицы и оно, как следствие, влияет на работоспособность зубчатого соединения редуктора.

Возможные смещения рабочих элементов трактовой части компрессора или турбины газотурбинного двигателя, создают выступы, и впадины в трактовой проточной части. Эти уступы непосредственно влияют на плавность движения газовых рабочих потоков и ухудшают качество работы изделия.

Возможные угловые погрешности, перекосы и смещения соединяемых элементов трубопроводных систем изделия, приводят к изменениям характера соединения при сборке и непосредственно влияют на герметичность и прочность соединительного стыка трубопровода.

Наличие угловой погрешности у зубчатого колеса, полученной в процессе изготовления непосредственно влияет на характер зацепления в зубчатом соединении, а также создает неравномерность цементационного слоя на зубе шестерни и как следствие неравномерности твердости на образующих поверхностях зубчатого венца. Эти характеристики непосредственно влияют на работоспособность шестерен.

В приведенных примерах показано, что при назначении допусков на различные элементы деталей и сборочных единиц необходимо учитывать влияние точности этих параметров на качественные показатели изделия в целом.

В тоже время при назначении допусков необходимо учитывать особенности производства отдельных деталей и ее элементов. Это позволяет создавать экономически выгодное, конкурентоспособное производство, которое может использовать автоматизированное получение параметров отдельных элементов деталей на современном оборудовании.

В качестве примера рассмотрим назначение допусков и направление возможных отклонений для проведения операции горячая штамповка заготовок в открытых штампах при автоматическом получении размеров на настроенном оборудовании. Рассмотрим процесс формирования линейных операционных размеров  $A_1$  и  $B$ .

На рис. 1.1 представлена схема формирования геометрических параметров заготовок в процессе горячей штамповки.

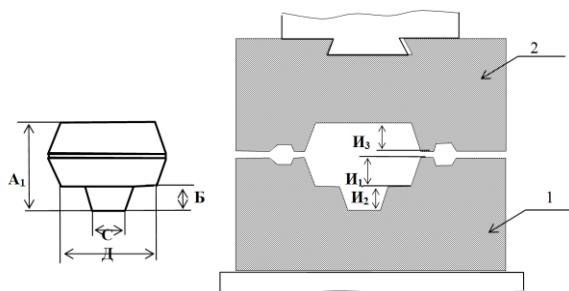


Рис. 1.1. Формирование операционных размеров заготовок

Неподвижная, нижняя часть штампа (позиция 1) установлена на столе прессы. Внутренняя полость этой половины штампа выполнена с определенными оптимальными, исполнительными размерами  $I_1$  и  $I_2$ , в механическом производстве при изготовлении оснастки для проведения операции горячей штамповки.

Подвижная, верхняя часть штампа (позиция 2) крепится к ползуну прессы и имеет исполнительный размер внутренней полости штампа  $I_3$ . Этот размер также выполняется при подготовке штамповочной оснастки. В процессе выполнения операции горячей штамповки оператор настраивает пресс для выполнения одного линейного операционного размера –  $A_1$ . Выполнение второго операционного размера  $B$  не зависит от оператора, т.к. этот размер при штамповке копируется на получаемую заготовку. В машиностроении такой размер принято называть внутрикомплексным размером. Физическая сущность происходящих процессов при формировании двух операционных размеров  $A_1$  и  $B$  разная. Поэтому и назначение допустимых отклонений на эти параметры, при одном и том же 5 классе точности разная. Например, при выполнении размера  $A_1=100$  мм верхнее отклонение задается со знаком  $+0,7$  мм, а нижнее отклонение задается со знаком  $-0,5$  мм. Для выполнения размера  $B=80$  мм верхнее и нижнее отклонения задаются симметрично расположенными и равными  $\pm 0,25$  мм. Из этого примера видно, что допуски и отклонения на них отличаются. Это вызвано тем, что условия при формировании заданных геометрических параметров различные. Размер  $A_1$  формируется за счет настройки и предусмат-

ривает точную остановку движения ползуна прессы. Выполнение размера  $B$  не зависит от настройки прессы. Этот размер получается методом копирования исполнительного размера  $I_3$  штампа. Заданные размеры и допустимые отклонения учитывают физическую сущность происходящих процессов при штамповке, которые связаны с направлением износа полости штампа во времени, появлением окалина при нагреве исходного материала, температурными изменениями и другими явлениями. Такой способ назначения размеров и допусков обеспечивает наиболее продолжительную работу штампов до их ремонта и восстановления.

Подобная методика назначения допусков и возможных отклонениях используется для получения поперечных операционных размеров заготовок (размеры  $C$  и  $D$ ).

С целью обеспечения заданной точности размеров  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $D$  во времени исполнительные размеры штампов ( $I_i$ ) выполняются как правило на порядок точнее чем операционные.

Несовершенство процессов штамповки предусматривает часто необходимость выполнения штамповочных уклонов, радиусов скругления, возможного смещения штампов в плоскости разъема и других явлений. Эти условия увеличивают слой металла на поверхностях заготовки, который формируется в виде напуска.

Необходимо отметить, что понятие точности в работах приводятся в различных вариантах:

Точность – степень соответствия изделия (степень приближения изделия) к заранее установленному прототипу.

Или под точностью детали понимают степень ее соответствия требованиям чертежа по геометрическим и другим параметрам

Или точность обработки детали есть степень соответствия ее действительных или ожидаемых (расчетных) геометрических параметров заданным. Эти представления точности позволяют выработать общее правильное понятие о точности изделия как токовое.

## **1.1. Параметры точности поверхностей деталей**

**1. Точность размеров поверхностей** деталей определяется и обеспечивается в соответствии с нормативами для полей допусков

и посадок различных видов и профилей обеспечивающих необходимые соединения в сборочных единицах.

Геометрическая точность поверхностей деталей назначают в соответствии с качествами точности, которые предусматривают 19 качеств: 01, 0, 1, 2,3, ..17. В порядке убывания точности допуски качеств условно обозначают IT01, IT0, IT1, ..... IT16, IT17 [1].

Разработанная единая система допусков и посадок позволяют определять допуски и посадки при различных номинальных размерах деталей.

В приложении 1 представлены расчетные формулы для определения допусков при различных качествах точности.

В этом приложении приведены также методы обработки, которые позволяют обеспечивать необходимую точность при экономической целесообразности процесса. Таблицы допусков на основные геометрические размеры для различных нормативных документов определяются единой системой качеств (классы точности, стандарт СЭВ и т.д).

Точностью геометрической формы поверхностей деталей, в литературе принято также называть, точностью размеров 1-го рода.

**2. Точность расположения поверхностей** деталей определяет отклонение реального положения рассматриваемого элемента детали относительно его номинального значения. Возможные отклонения параметров расположения поверхностей деталей существенно влияют на качественную работу изделия.

При оценке величины отклонения расположения поверхности из рассмотрения исключают отклонение формы рассматриваемых базовых элементов. Для этого реальные поверхности и профили заменяют прилегающими. При назначении допустимых отклонений на расположение поверхностей используют 16 степеней точности, в зависимости от номинальных длин нормируемых участков поверхностей. Данные степени точности позволяют задать допустимые значения перпендикулярности, наклоны торцевых и полных торцевых биений, радиальных биений цилиндрических поверхностей, соосности поверхностей и другие возможные отклонения.



В приложениях 2, 3 представлены допуски на расположение поверхностей деталей относительно друг друга. Приведенные таблицы позволяют определить и назначить допуски на параллельность, перпендикулярность, наклон поверхностей и т. п.

Точность расположения формы поверхностей деталей относительно друг друга, в литературе принято также называть, точностью размеров 2-го рода.

**3. Отклонение поверхностей** различают в зависимости от длины шага  $S$  к высоте неровностей  $H$ :

**а) Точность геометрической формы** поверхности рассматривают на больших участках детали. При  $S/H > 1000$  имеют место отклонения от правильной геометрической формы поверхности (конусность, овальность, неплоскостность и т. п.).

Погрешность формы поверхности (овальность, конусность, карсетность, неплоскостность и т.д) в авиадвигателестроении, как правило, не превышают  $1/3$  допуска на точность геометрической формы поверхности.

При изготовлении маложестких, ажурных деталей двигателя, когда весьма сложно обеспечить параметры точности по форме поверхности, иногда в чертеже детали и в операционном эскизе технологического процесса предусматривается контроль геометрической формы поверхности непосредственно на станке. Этот прием упрощает производство деталей такого типа, но может снижать качественные показатели изделия.

**б) Волнистость поверхности**, рассматривают как совокупность периодически повторяющихся неровностей на поверхности детали. При  $S/H = 50 \dots 1000$  волнистостью поверхности считают неровности с шагом  $1 \dots 10$  мм. Высота неровностей волнистости и высота шероховатости практически одинакова; отношение же длины шагов к высоте неровностей различное.

Параметры волнистости поверхностей в РФ не стандартизованы и при ее назначении руководствуются отраслевыми нормами и рекомендациями института Машиноведения Академии наук, которые предусматривают 9 классов волнистости с величиной волнистости от 1 до 250 мкм.

**в) Шероховатость поверхности**, рассматривают как совокупность неровностей с относительно малым шагом  $S/H < 50$ , образующих рельеф поверхности (рис. 1.2).

Для оценки отклонений шероховатости поверхностей в рекомендациях ISO приняты две системы отсчета высот неровностей: система *M* и *E*. В системе *M* отсчет высот неровностей производится от средней линии профиля, а в системе *E* отсчет высот производится от огибающей линии неровностей поверхности. Термины и определения основных понятий по шероховатости поверхности соответствуют ГОСТ 25142-82 и ГОСТ 2789-73, а также ГОСТ 11141-84 (для оптических деталей) и ГОСТ 7016-82 для древесины.

Параметры волнистости и шероховатости поверхностей должны быть значительно меньше допустимых значений точности проверяемых поверхностей.

Шероховатостью поверхности называется совокупность неровностей с относительно малыми шагами, выделенная с помощью базовой длины.

Базовая длина  $l$  – длина базовой линии, используемая для выделения неровностей, характеризующих шероховатость поверхности.

Шаг неровностей – отрезок средней линии профиля, ограничивающий неровность профиля (т.е. выступ профиля и сопряженную с ним впадину профиля). Шероховатость поверхности оценивается от средней линии профиля  $m$  – базовой линии, имеющей форму номинального профиля и проведенной так, что в пределах базовой длины среднее квадратическое отклонение профиля ( $y_i$  – расстояние между любой точкой профиля и средней линией) до этой линии минимально (см. рис. 1.1).

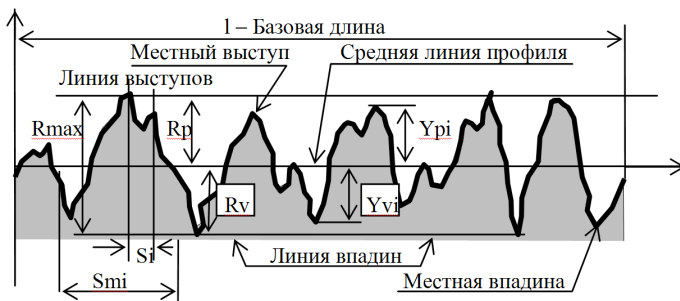


Рис. 1.2. Шероховатость поверхности детали

Числовые значения параметров шероховатости принимаются в соответствии с нормативами (числовые значения шероховатости по ГОСТ2789-73). Высота неровностей профиля по десяти точкам  $Rz$ , определяется по расчетной формуле:

$$Rz = \frac{\sum_{i=1}^5 [Y_{pi}] + \sum_{i=1}^5 [Y_{vi}]}{5},$$

где  $Y_{pi}$  – высота  $i$ -го наибольшего выступа профиля;

$Y_{vi}$  – глубина  $i$ -й наибольшей впадины профиля.

Среднее арифметическое отклонение профиля  $Ra$  в пределах базовой длины определяется по формуле:

$$Ra = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [Y_i],$$

где  $n$  – число выбранных точек профиля на базовой длине;

$y_i$  – отклонение профиля или расстояния между точкой профиля и базовой (средней) линией.

В табл. 1.1 представлены числовые значения параметров шероховатости в соответствии с ГОСТ 2789-73. Предпочтительные значения параметров подчеркнуты.

Т а б л и ц а 1.1

Высотные параметры, мкм.					Шаговые параметры, мм.							
Rz, Rmax	Ra	Rz	и	Rmax	Ra	Sm	и	S				
-	1000	100	10	1,00	0,10	-	0,01	-	10	1,00	0,100	0,01
-	800	80	8	0,8	0,08	-	0,008	-	8	0,80	0,080	0,008
-	630	63	6,3	0,63	0,063	-	-	-	6,3	0,63	0,063	0,006
-	500	50	5	0,50	0,050	-	-	-	5	0,50	0,050	0,005
-	400	40	4	0,40	0,040	-	-	-	4	0,40	0,040	0,004
-	320	32	3,2	0,32	0,032	-	-	-	3,2	0,32	0,032	0,003
-	250	25	2,5	0,25	0,025	-	-	-	2,5	0,25	0,025	0,002
-	200	20	2	0,20	-	0,020	-	-	2	0,20	0,020	-
1600	160	16	1,6	0,16	-	0,016	-	-	1,6	0,16	0,016	-
1250	125	12,5	1,25	0,125	-	0,012	-	12,5	1,25	0,125	0,0125	-

## 1.2. Параметры качества материала детали

При конструировании изделий, сборочных единиц и отдельных деталей важное внимание уделяется выбору и назначению материала. Этот выбор зависит от способа изготовления материала (например, для производства стали, применяется способ мартеновский, конверторный, электросталь т. п.); выбору по химическому составу – сталь углеродистую и легированную, инструментальную и с особыми свойствами, по структуре и по качеству.

При выборе материала конструктор, уделяет большое внимание возможности, обеспечения качественных характеристик материала по параметрам прочности и твердости, как в состоянии поставки материала, так и в процессе изготовления этих деталей. Например, повышение твердости материала за счет применения термических и термохимических операций позволяет повысить качество изделия [3]. Использование специальных покрытий увеличивает термическую и коррозионную стойкость деталей и т.д.

### Механические свойства материала и запасы прочности.

Основные механические свойства материала (см. рис. 1.3):

**а) Прочность** – способность материала сопротивляться нагрузкам.

**б) Пластичность** – способность материала получать значительную (остаточную) деформацию не разрушаясь.

**в) Выносливость** – способность материала сопротивляться разрушению от усталости, т. е. от возникновения и развития трещины под влиянием многократно повторяющихся нагружений.

г) **Твердость** – способность материала сопротивляться при местных контактных воздействиях пластической деформации или хрупкому разрушению в поверхностном слое.

Свойства материала при постоянных напряжениях.

**Статическое растяжение.**

Условное напряжение:

$$\sigma = P/F_o,$$

где  $P$  – нагрузка;

$F_o$  – площадь поперечного сечения образца до деформации.

Зависимость относительного удлинения:

$$\varepsilon = \Delta/L_o,$$



Рис. 1.3 Диаграмма растяжения

**Предел выносливости.**

Предел выносливости ( $\sigma_r$ ) симметричного цикла обозначают  $\sigma_{-1}$ , так, как для такого цикла  $r = -1 (\sigma_{min} = -\sigma_{max})$ .

На основании работ исследователей, значения механических свойств материалов определена возможность использования их в производстве авиационных двигателей. Эти материалы применяются для создания оборудования, оснастки и различных устройств технологического назначения; а также для изготовления отдельных деталей ГТД.

Представленные значения механических свойств материалов позволяют определять и прогнозировать прочностные характеристики разрабатываемых конструкций технологической оснастки и различных изделий.

Химический состав позволяет выбрать наиболее технологичные материалы в производстве и назначить необходимые термические операции.

В таблицах используются условные обозначения отдельных термических операций для выбранного материала: С – старение; Н – нормализация; З – закалка; О – отжиг; Ц – цементация; Ж – отжиг; ЖВ – высокий отжиг.

Применение различных термических и термохимических операций позволяют улучшить показатели качества материала и создать оптимальные условия для работы изделия.

Обычно чем тверже материал, тем выше его статическая прочность.

Твердость по Бринелю ( $HB$ ) определяют вдавливанием в испытуемый материал шарика из закаленной стали.

$$HB = \frac{2D}{3,14\ddot{A}(\ddot{A} - \sqrt{(\ddot{A}^2 - \dot{a}^2)}}.$$

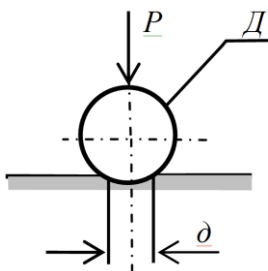


Рис. 1.4. Схема проверки твердости по Бринелю

При определении твердости по Роквеллу определяется глубина проникновения в металл алмазного или стального наконечника. Испытуемое изделие проходит четыре стадии внедрения алмазного наконечника, угол у вершины которого равен  $120^\circ$ . Эти стадии показаны на рис. 1.5.

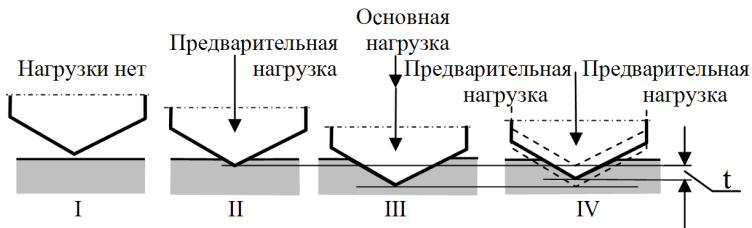


Рис. 1.5. Схема проверки твердости по Роквеллу

В зависимости от твердости металла применяются два вида наконечника – закаленный шарик диаметром  $1,6\text{ мм}$  для испытания мягких материалов  $HRC < 24$  и алмазный конус с углом при вершине  $120^\circ$  и радиусом закругления  $0,2\text{ мм}$ . Условия определения твердости на приборе Роквелла (ТК) приведены в табл. 1.2.

В случаях, когда необходимо измерять твердость в тонких поверхностных слоях, не продавливая их, применяется шкала А и нагрузка  $600\text{ Н}$ , например при определении твердости цементационного слоя небольшой глубины, цианированного слоя и т.п. Для испытания твердости тонких поверхностных слоев (толщиной  $0,03\text{--}0,3\text{ мм}$ ), применяют приборы типа ТКС («Суперроквелл») с нагрузкой  $147, 394$  и  $441\text{ Н}$ .

Т а б л и ц а 1.2

Твердость	Вид наконечника	Нагрузка Н	Шкала	Обозначение твердости	Допустимые пределы измерения по шкале
Менее 24	Стальной шарик диаметром $1,6\text{ мм}$ .	980	В	HRB	25 – 100
20 – 67	Алмазный конус с углом при вершине $120^\circ$	1471	С	HRC	20 – 67
Св. 66	Алмазный конус с углом при вершине $120^\circ$	588	А	HRA	70 – 85

В зависимости от используемого материала и его механических свойств, производится, часто, проверка его твердости. Чем тверже материал, тем выше статическая прочность. Проверка твердости без разрушения материала проводится по Бринеллю (НВ) (рис. 1.4),

вдавливанием закаленного металлического шарика и по Роквеллу (шкала С).

Соотношения между числами твердости по Бринелю, Роквеллу и пределом прочности для сталей представлены в приложении 4.

### **1.3. Параметры поверхностного слоя**

Поверхностный слой детали из конструкционных сталей и сплавов после механических и физико-химических методов обработки характеризуется, в основном, параметрами шероховатости, глубиной и степенью упрочнения и остаточными микронапряжениями. Глубина наклепа поверхностного слоя после обработки резанием металлическим и абразивным инструментом возрастает с увеличением подачи, глубины резания, радиуса скругления резца и износа режущего лезвия. Величина наклепа на обработанной поверхности в малой степени зависит от изменения режимов и других условий обработки. Деформационное упрочнение поверхностного слоя после механического полирования незначительно как по интенсивности, так и по глубине проникновения в поверхностный слой.

В процессе обработки резанием металлическим и абразивным инструментом жаропрочных сплавов в поверхностном слое возникают преимущественно растягивающие микронапряжения, имеющие максимальное значение на поверхности или в непосредственной близости от нее.

Различными методами упрочнения (дробеструйная обработка, гидровиброгалтовка и т. д.) в поверхностном слое детали создаются сжимающие микронапряжения, величина и глубина их залегания определяется режимами упрочняющей обработки.

Анализ состояния поверхностного слоя для жаропрочных и титановых сплавов (ХН77ТЮ, ХН77ТЮР, ХН70ВМТЮ, ХН70ВМТЮФ, ХН55ВМТФКЮ, ХН56ВМКЮ, ЖС6К, ЖС6КП, ВТ-3, ВТ-8, ВТ-9 и других материалов), после различных методов и режимов обработки проведены исследователями МАИ.

В поверхностном слое можно выделить следующие основные зоны:



*зона 1* адсорбированных из окружающей среды молекул и атомов органических и неорганических веществ, ее толщина  $1...10^2$  нм;

*зона 2* продуктов химического взаимодействия металла с окружающей средой толщиной  $10^{-3}...1$  мкм;

*границная зона 3* толщиной в несколько межатомных расстояний; металл в этой зоне имеет иные чем в объеме, кристаллическую и электронную структуры;

*зона 4* с измененной структурой, фазовым и химическим составом, она возникает в процессе изготовления и эксплуатации деталей ее толщина  $0,01...0,1$  мм.

Поверхностный слой оказывает существенное влияние на надежность работы деталей машин в целом.

**Остаточными напряжениями** принято называть такие напряжения, которые существуют и уравниваются внутри твердого тела после устранения причин, вызвавших их появление.

Н.Н. Довиденков классифицировал эти напряжения по протяженности силового поля:

*напряжения I рода* (макронапряжения) охватывают макрообъемы соизмеримые с размерами детали;

*напряжения II рода* (микронапряжения) распространяются в микрообъемах (отдельных зернах, блоках, и их группах);

*напряжения III рода* локализуются в субмикрообъемах, линейный размер которых соизмерим по величине с межатомным расстоянием.

**Микронапряжения** в детали возникают в результате воздействия различных технологических процессов при изготовлении.

Каждый технологический процесс, участвующий в механизме образования остаточных напряжений детали, имеет свои особенности, но в основе его лежит необратимое неоднородное распределение деформации по объему детали.

В приложении 5 приведены значения параметров поверхностного слоя жаропрочных и титановых сплавов после различных методов обработки.

## ГЛАВА 2. КЛАССИФИКАЦИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ

В зависимости от выполняемых функций в изделии все поверхности деталей делятся на три группы:

- а) Конструкторские поверхности;
- б) Рабочие поверхности;
- в) Свободные поверхности.

### 2.1. Конструкторские поверхности

Конструкторские поверхности выполняют важнейшую функцию детали и к ним предъявляются высокие требования.

Определение: **Конструкторской, называется поверхность, которая определяет положение детали в сборочной единице.**

Конструкторские поверхности деталей могут быть различного исполнения: плоские, цилиндрические, сферические, конические, фасонные, а также в виде сочетаний различных элементарных участков поверхностей.

Количество конструкторских поверхностей у детали должно быть минимальное и достаточное, чтобы обеспечивать ее положение в пространстве. Деталь в изделии должна занимать и строго сохранять определенное положение в течение всего времени эксплуатации.

Конструкторские поверхности детали можно разделить на два вида: **основные и вспомогательные.**

Определение, приведенное выше, для конструкторской поверхности можно показать на примере для полной ориентации детали в пространстве. В этом случае необходимо исключить возможность трех прямолинейных движений детали в направлении выбранных координатных осей и трех вращательных движений вокруг этих или параллельных осей, (т.е. лишить деталь шести степеней свободы).

Исходя из условий эксплуатации детали в изделии, количество лишаемых степеней свободы, может быть уменьшено. Например, для создания движения детали в прямолинейном, вращательном или другом необходимом направлении.

Частичное лишение свободы детали от линейных и вращательных перемещений можно обеспечить, используя, различные конструктивные схемы, которые позволяют лишать необходимого количества степеней свободы.

В практике конструктора и технолога, при создании изделия авиадвигателестроения используются различные сочетания видов конструкторских поверхностей. Количество этих поверхностей принимается минимально необходимое. При разработке конструкции деталей маложестких изделий, для обеспечения прочностных характеристик используют дополнительные конструкторские поверхности, которые позволяют изменить силовую схему детали в изделии и улучшить эксплуатационные характеристики этого изделия. Необходимо отметить при этом, что введение дополнительных конструкторских поверхностей вносит некоторую неопределенность в точность расположения детали в пространстве.

На рис. 2.1а представлена цилиндрическая *шестерня 1*, положение которой в сборочной единице определяется установкой на *вал 2* и угловой ориентацией с помощью *шпонки 3*. Образующая поверхность  $K_1$  отверстия, торцевая поверхность  $K_2$  и поверхности  $K_3$  шпоночного паза являются **конструкторскими поверхностями**, так как, они определяют положение шестерни в пространстве.

На рисунке 2.1б представлены возможные положения шестерни на валу в зависимости от перекоса поверхности  $K_1$ , относительно поверхности  $K_2$  и возможного зазора между отверстием в шестерни и валом. Эти положения создают перекося шестерни на валу и ухудшают контакт между образующими поверхностями в зубчатом зацеплении.

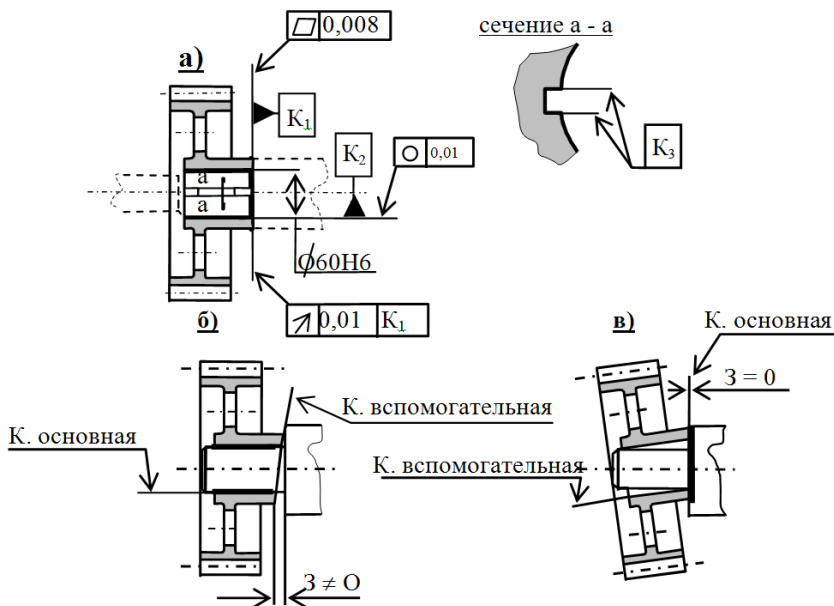


Рис. 2.1. Конструкторские поверхности детали

С целью уменьшения влияния данного перекоса на положение шестерни в сборочной единице, одна поверхность ( $K_1$ ) принимается за **основную конструкторскую поверхность**. Эта поверхность выполняется со значительной протяженностью и с минимальным допустимым отклонением для размера отверстия (размера 1 рода). Точность отверстия - основной конструкторской поверхности, выполняется, как правило, в пределах IT5, IT6.

Поверхность  $K_2$  принимается за **вспомогательную конструкторскую поверхность** и выполняется с минимально-возможной протяженностью. Точность расположения этих конструкторских поверхностей относительно друг друга определяются размерами 2 рода, которые выполняется с высокой точностью. Это условие обеспечивает уменьшение степени влияния точности размера 2 рода на положение шестерни в сборочной единице.

Необходимо отметить, что расположение конструкторских поверхностей задаются в чертежах размерами или техническими тре-

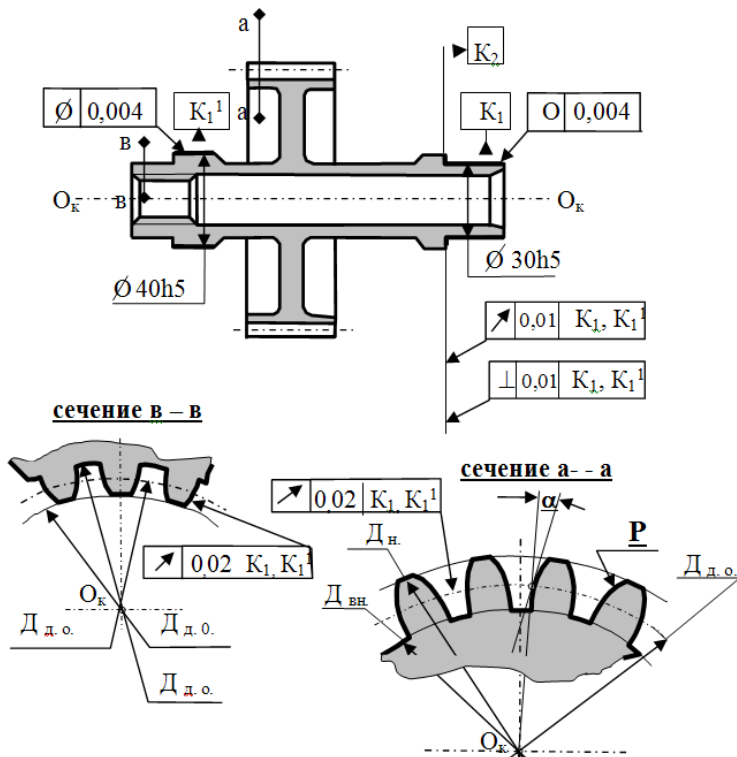
бованиями непосредственно относительно друг друга. Связь через другие поверхности не допускается (не желательна), так как это приводит к удорожанию производства и ухудшению качественных характеристик изделия.

**Дополнительные конструкторские поверхности**, используемые при проектировании деталей позволяют «увеличить» протяженность основной конструкторской поверхности. Например, у вала шестерни (рис. 2.2а), цилиндрический поясok  $K'$  детали используется для установки вала во второй подшипник. Такое ориентирование детали в сборочной единице обеспечивает необходимые качественные показатели. Дополнительные конструкторские поверхности могут быть также использованы для повышения прочности детали.

Например, при установке лопаток турбины ГТД в диске. Вместо одной пары выступов елочного замка, которые являются основными конструкторскими поверхностями, используются еще несколько дополнительных выступов. Эти дополнительные выступы позволяют увеличить прочность лопатки и надежность ее соединения с диском турбины, обеспечив при этом компактность конструкции в соединении.

В авиадвигателестроении к качеству конструкторских поверхностей предъявляются высокие требования:

Точность размеров поверхностей задается в пределах IT5, IT6.



Т.Т. Вал цементовать; глубина цементации 0,6 – 0,9мм.  
 Твердость на цементируемой поверхности не менее HRCэ 56 ед.  
 Рис. 2.2. Вал-шестерня коробки приводов агрегатов ГТД

Погрешность формы конструкторской поверхности не должна превышать  $1/3$  допуска на заданный размер этой поверхности;

Конструкторские поверхности должны иметь непосредственную размерную связь между собой. Связь через другие поверхности не рекомендуется.

Точность размеров, определяющих расположение поверхностей относительно друг друга, выполняется в пределах 5, 6 степени точности (см. приложение 3, 4).

Допуски на параллельность, перпендикулярность, наклон, торцевое и полное биение, соосность и т. д. выполняются для кон-

структорских поверхностей в пределах 5, 6 степени точности (см. приложение 3, 4).

## 2.2. Рабочие поверхности

Рабочими поверхностями называются поверхности, которые определяют назначение детали. Детали и их поверхности имеют множество различных назначений. Так, например, рабочими поверхностями шестерни (рис. 2.1) является зубчатый венец. Точность рабочих поверхностей, как правило, выполняется с повышенной точностью (5, 6 квалитет), в зависимости от условий эксплуатации изделия.

Для шестерен соответственно разработаны нормативы степеней точности (1–12), которые определяются кинематической точностью, точность определяющая плавность движения и точностью, которая определяет контакт между рабочими поверхностями зубьев шестерни. В авиационном двигателестроении используются шестерни 5–8 степени точности.

Рабочие поверхности выполняются с высокими показателями по шероховатости ( $Rz=1,6-0,08$  мкм). Такие высокие требования к рабочим поверхностям во многом зависят от тех условий, в которых работают данные поверхности.

С целью повышения работоспособности рабочих поверхностей, часто эти поверхности подвергаются термохимическим операциям. Проведение цементации, закалки и последующего отпуска позволяют улучшить условия работы шестерен. Использование других термических и термохимических операций направлены на увеличение ресурса и качества работы детали.

С целью улучшения данных поверхностей они часто подвергаются гальваническим операциям, где обеспечивается создание защитного слоя предохраняющего рабочие поверхности.

Высокие требования предъявляются к рабочим поверхностям по расположению их относительно конструкторских поверхностей. Технические требования по допустимому смещению, параллельности образующих поверхностей должны задаваться в чертежах и технологических эскизах непосредственно относительно конструкторских

торских поверхностей. Это условие упрощает производство деталей и улучшает качество работы изделия в целом.

Необходимо отметить, что назначение детали может заключаться в «пассивной» работе, например, обеспечивать герметичность соединений и плотность прилегания различных элементов конструкции сборочной единицы.

### **2.3. Свободные поверхности**

Эти поверхности определяют связь рабочих и конструкторских поверхностей. Чем меньше свободных поверхностей, тем компактней разработана конструкция детали. Так, например, поверхность шарика шарикоподшипника, является одновременно конструкторской, рабочей и свободной поверхностями. К свободным поверхностям предъявляются требования по точности в пределах 13 качества, если поверхности предусмотрено обрабатывать резанием. Если свободные поверхности выполняются методом холодной штамповки, или другими способами предварительного производства, то требования по точности задаются в пределах 14–15 качества. Шероховатость свободных поверхностей, как правило, выполняются в пределах  $Rz=40-80$  мкм.

В отдельных случаях к свободным поверхностям могут быть повышены требования по одному или нескольким параметрам. Так, например, полотно диска турбины или компрессора подвергается полированию, с целью устранения концентраторов напряжения в поверхностном слое детали. В этом случае требования по шероховатости данных поверхностей возрастают.

## **ГЛАВА 3. РАСЧЕТЫ ТОЧНОСТИ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ И МОДЕЛЕЙ**

### **3.1. Структурно-логическая схема обеспечения показателей качества.**

К числу основных показателей качества, характеризующих технические данные современных машин, относятся показатели мощности, расхода топлива, масса изделия, габаритных размеров, ресурса и т.д. По мере развития техники указанные параметры изме-



няются. Показатели мощности возрастают, повышается экономичность, уменьшаются габаритные относительные размеры и масса, увеличивается ресурс работы изделия.

Выполнение заданных требований проводится на основании глубоких исследований и конструкторско-технологической проработки изделия. При проектировании должны быть выбраны такие формы деталей, которые обеспечивают наибольшую долговечность. Точность выполнения геометрических параметров должна быть экономически целесообразной и обеспечивать надежную работу и эксплуатацию деталей, сборочных единиц и всего изделия в целом. Обеспечение показателей качества (ПКИ) – одна из важнейших задач, решаемых на этапе конструирования и разработки технологических процессов.

Функциональные связи ПКИ с технологическими параметрами определяются согласно структурно-логической схеме рис. 3.1. В этой схеме можно выделить несколько уровней конструкторской и технологической сфер реализации функциональных связей. Эксплуатационные связи характеризуют обеспечение основных параметров изделия. Эти характеристики зависят от геометрических, физико-механических и других параметров деталей изделия, а также от параметров, которые воздействуют на изделие в процессе его эксплуатации. К геометрическим параметрам изделия относятся осевые и радиальные зазоры в соединениях и передачах ( $K_z, \overline{K_z}$ ), отклонение формы поверхностей деталей ( $K_\phi$ ) входящих в изделие, шероховатости на рабочих и конструкторских поверхностях ( $K_{Ш}$ ) и т.п. Физико-механические параметры определяются твердостью деталей изделия ( $HRC$ ), глубиной наклепанного слоя ( $K_{H.C}$ ), остаточными напряжениями в поверхностном слое детали ( $K_{OC}$ ) и т.п. Воздействующие на изделие и его элементы силовые и температурные факторы ( $P, T$ ) представлены как усилия, возникающие при эксплуатации изделия и неравномерном нагреве деталей. Величины параметров и их взаимодействие в процессе эксплуатации определяют выходные качественные характеристики, и стабильность их во времени.

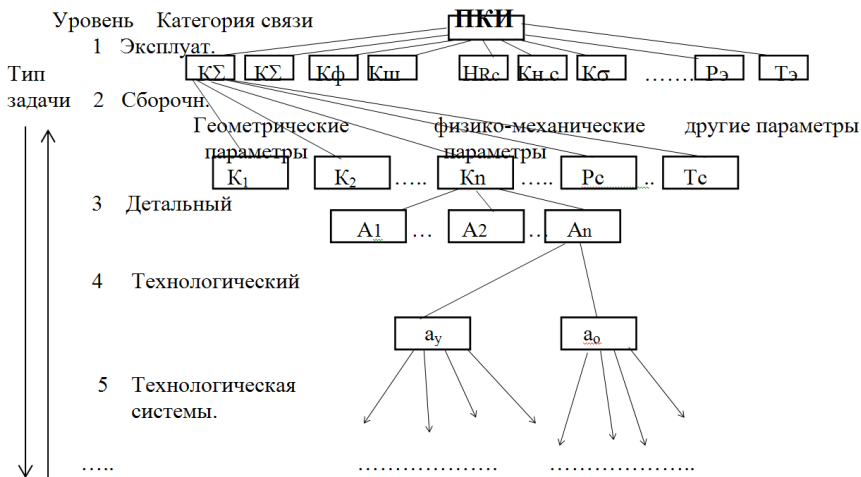


Рис. 3.1. Структурно-логическая схема обеспечения ПКИ

Сборочные связи (уровень 2) характеризуют выполнение выходных параметров изделий в процессе сборки. В структурно-логической схеме рис. 3.1 рассмотрена одна из веток обеспечения основных геометрических параметров размеров ( $K_{\Sigma}$ ), которая показывает, что выполнение данного размера зависит от геометрических параметров деталей, входящих в сборочную единицу ( $K_1, K_2, \dots, K_n$ ), а также от других факторов, воздействующих на детали в процессе сборки. Эти воздействия проявляются как силовые  $P_c$  (усилия затяжки соединения, усилия запрессовки деталей и т. п.) и температурные  $T_c$  (нагрев и охлаждение деталей в процессе сборки).

Детальные связи (уровень 3) дают возможность вскрыть существующие связи между конструкторскими и операционными размерами этих деталей. Они отражают особенности построения технологических процессов изготовления деталей и способов обеспечения требований, заданных в чертеже.

Следующий уровень (уровень 4) вскрывает связи в технологической системе (станок, приспособление, инструмент, деталь). На этом уровне выделяются два основных параметра, связанных с установкой и обработкой детали ( $a_y, a_o$ ), и от применения техноло-

гических схем обработки зависит качественное выполнение заданных операционных размеров ( $A_{on}$ ).

Рассматривая следующий уровень связей ПКИ, можно найти, что размеры, определяющие установку детали ( $a_y$ ), находятся в непосредственной связи с применяемой оснасткой ( $A_{пр}$ ) и оборудованием ( $A_{ст}$ ), с их точностью и жесткостью. Остаточные изменения геометрических параметров, связанные с процессом обработки ( $a_o$ ) зависят от кинематической точности применяемого оборудования ( $A_{кин}$ ), величины отжатия ( $A_{отж}$ ), имеющей место в процессе обработки заготовки, износа режущего инструмента и оборудования ( $A_{изн}$ ) и т.п.

Рассматривая ветку структурно – логической схемы параметра отжатия элемента детали в процессе обработки ( $A_{отж}$ ), видим, что он находится в непосредственной связи с величинами удаляемых припусков металла и режимами обработки в данной операции ( $A_z, A_v, A_o$ ). Если рассмотреть функциональные связи физико-механических параметров деталей изделия, то можно заметить подобную тенденцию образования уровней связей.

Структурно- логическая схема показывает неразрывность связей показателей параметров качества всех уровней с выходными ПКИ и вскрывает сферы реализации конструкторско-технологических разработок.

Задачи конструкторской сферы реализации заключаются в определении параметров изделия с целью обеспечения необходимых показателей качества.

Задача технологической сферы реализации заключается в выполнении данных параметров на основе расчета и правильного построения технологических процессов.

Первый и второй этапы сферы реализации представляют соответственно движение от общего к частному и обратно от частного к общему. В связи с этим возникают задачи двух типов – синтеза и анализа.

При решении задач синтеза для любого параметра назначаются допустимые границы (допуски  $T$ ), детерминированные условиями обеспечения ПКИ.

При анализе качественных показателей различных уровней производства изделий по имеющимся (ранее назначенным) составляющим параметрам и допускам определяются возможные значения выходных ПКИ.

Структурно-логическая схема позволяет выявить последовательность решения различных инженерных и исследовательских задач.

Важным условием при оценке точности конструкции изделия и технологического процесса является соответствие расчетных значений параметров полученных в процессе решения задач синтеза и обеспечения этих показателей в процессе проведения анализа расчетных значений. Эти задачи решаются на основе существующих и разрабатываемых методов оценки точности на всех уровнях структурно-логической схемы.

Приоритет в области разработки геометрической схемы точности линейной размерной цепи принадлежит Б. С. Балакшину /4.1, 4.2/. Им впервые была предложена схема размерной цепи и сформулированы основные положения для ее решения.

Попытка представить геометрическую схему векторной размерной цепи предпринята в работе /4.6/. По этой схеме, результирующий вектор определяется путем проектирования составляющих векторов цепи на фиксированное направление наибольшего из них, принимаемого условно в качестве скалярной величины, т.е. фактически результирующий вектор определяется в заданном направлении. Основное несоответствие этой схемы с реальной заключается в том, что вектор, на который проектируются остальные составляющие звенья векторной цепи, в действительности не является фиксированной скалярной величиной.

### 3.2. Классификация размерных связей систем и моделей

От правильного назначения размеров, технических требований и допустимых отклонений на геометрические параметры деталей во многом зависит надежность и долговечность работы изделия. Взаимозаменяемость деталей и сборочных единиц, простота применяемой оснастки в процессе изготовления, возможность обеспечения параметров в автоматическом режиме обработки и сборки находятся в прямой зависимости от правильности размерных связей поверхностей деталей. Экономические показатели изделия также зависят от геометрической точности деталей и оптимальности размерных связей поверхностей деталей и сборочных единиц.

Существующие способы представления деталей и сборочных единиц в чертежах и в технологических процессах базируются на определенных правилах проектирования. Инженер использует основные плоскости проекций. Виды, сечения, разрезы, изображенные на этих проекциях, дают плоские представления о проектируемом предмете. Размерные связи, имеющие место в этих изображениях, определяют возможное положение точек относительно друг друга. Вторая проекция, или специальные технические условия, например биение, смещение, неплоскостность поверхности и т.п., создают пространственное представление об элементах деталей.

Основные координатные плоскости:  $XOY$  – горизонтальная плоскость проекции ( $H$ );  $XOZ$  – фронтальная плоскость проекции ( $V$ );  $YOZ$  профильная плоскость проекции ( $W$ ) и дополнительные плоскости, полученные при создании чертежей и объемных моделей, создают условия для получения пространственного представления о детали, сборочной единицы и изделия в целом.

Последовательность построения элементов деталей в проекциях чертежей, взаимное положение этих проекций имеют неразрывную, строго определенную размерную связь. Выявление области рассеивания точек элементов деталей, выполняются с помощью размерных цепей.

На рис. 3.2 дан эскиз диска компрессора. Размеры, представленные в основных  $V$ ,  $H$  и дополнительных  $W_1$ ,  $V_2$ , плоскостях, определяют неразрывную размерную связь элементов замковой части диска (сечение  $A_1-A_1$ ), необходимой для установки лопатки компрессора с конструкторскими поверхностями  $D$ ,  $T$ ,  $I$  диска. Размеры  $390$ ;  $21$ ;  $2^{\circ}32'10''$ ;  $8,8$ ;  $135$  и допуски на эти параметры, заданные в основных плоскостях, и размеры  $334$ ;  $3$ ;  $6,816$ , заданные в дополнительных плоскостях, определяют суммарный пространственный вектор расположения и его возможные отклонения от номинального значения, определяющего положение паза замка диска компрессора относительно конструкторских поверхностей. Суммарные пространственные вектора пазов диска компрессора соответственно определяют возможные смещения лопаток в диске компрессора и влияют на выходные ПКИ.

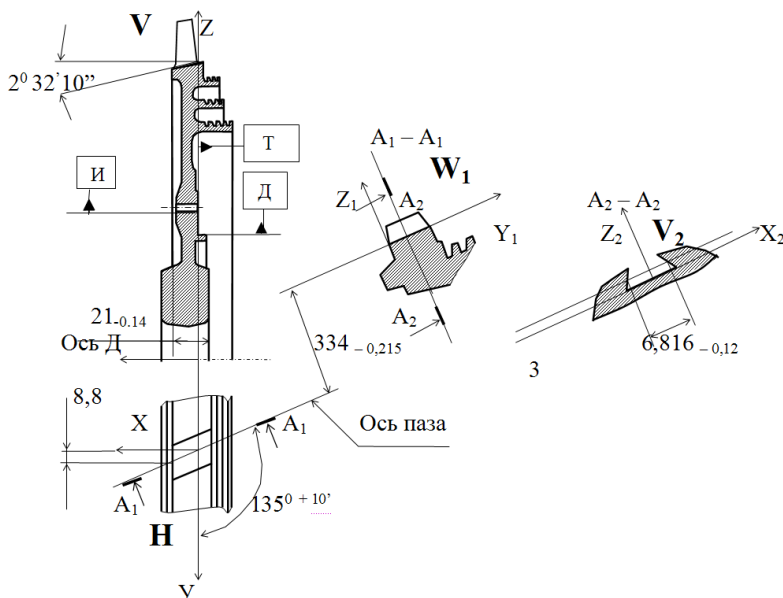


Рис. 3.2. Диск компрессора ГТД

При разработке пространственных математических моделей деталей с помощью компьютерных программ, чертежей и эскизов конструктор и технолог определяют необходимое и достаточное

количество геометрических параметров для координации на плоскости различных точек поверхностей относительно выбранных исходных координат. Способы задания точек на плоскости могут быть различными. Для создания пространственного представления о деталях и сборочных единицах и возможности их изготовления разработчик вводит дополнительные проекции, на которые наносит необходимую информацию о геометрических параметрах детали. Существующие размерные связи поверхностей деталей машин делятся на три вида:

1. линейные размерные связи;
2. плоскостные размерные связи;
3. пространственные размерные связи.

Виды размерных связей в изделиях и технологических процессах.

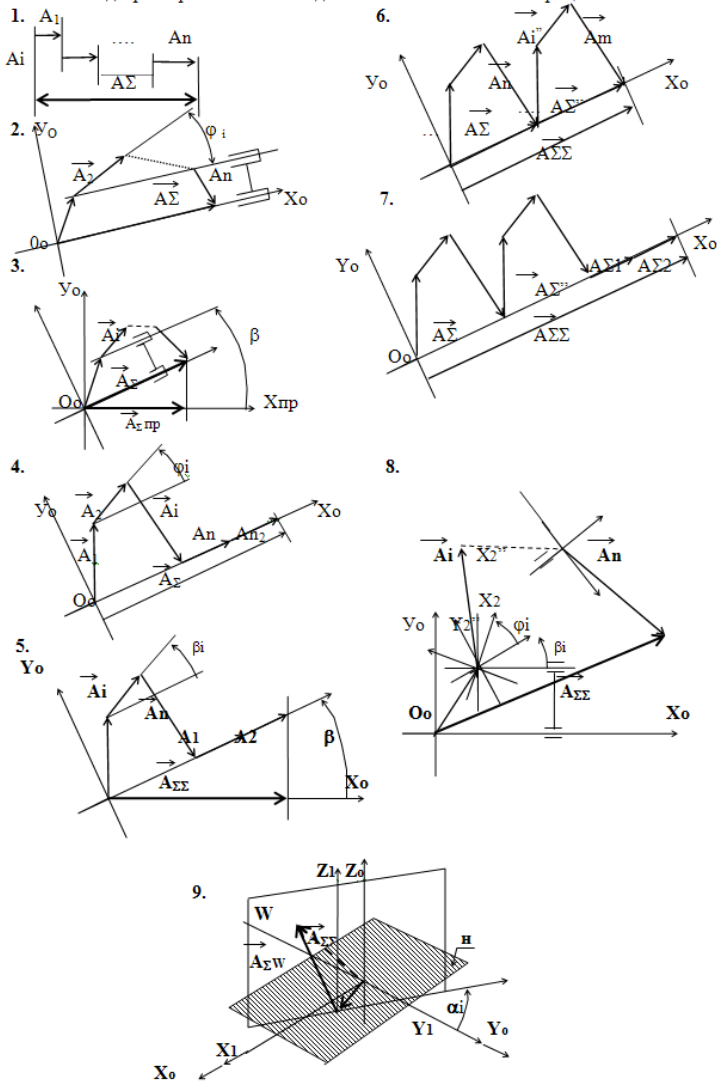


Рис. 3.3. Классификация размерных связей

На рис. 3.3(1) представлена линейная (скалярная) размерная связь. Составляющие и замыкающие звенья этой размерной цепи параллельны. С помощью линейных размерных связей решаются задачи синтеза и анализа при конструировании и изготовлении из-



делий. Размерные связи позволяют определять припуски и операционные размеры номинально расположенных параллельно плоских поверхностей, рассчитывать осевые зазоры и натяги в элементах конструкций изделий и решать различные задачи точности. Составляющее звено линейной размерной цепи определяется одним геометрическим параметром ( $A_i$ ) и допуском ( $T_i$ ) на заданный параметр. Результатами расчетов этого вида цепей являются величины предельных отклонений составляющих и замыкающих звеньев (в зависимости от типа задач), а также значения вероятностных характеристик этих звеньев. Существующая теория и методики расчетов позволяют оценивать необходимые звенья. В машиностроении с помощью таких цепей решаются более 60 % всех размерных задач. Необходимо отметить, что решение с помощью линейных размерных цепей дают приближенные расчетные значения, т.к. не учитывают фактические, возможные не параллельные положения соединяемых поверхностей.

Плоскостные размерные связи имеют большое количество разновидностей и представлены на рис. 3.3(2–7).

На рис. 3.3(2) показана плоскостная размерная цепь типа вал-втулка. Данная цепь позволяет определять смещение осей ( $\overline{A_2}$ ) номинально - соосных поверхностей вращения для процесса изготовления деталей и их сборки. Составляющие и замыкающие звенья этих векторных размерных цепей определяются двумя параметрами ( $|\overline{A_i}|, \varphi$ ) и допустимыми отклонения на заданные параметры ( $T_{A_i}, \varphi_i$ ). На практике часто расчетчика (конструктора или технолога) интересует только один параметр данной плоскостной размерной цепи - модуль вектора ( $|\overline{A_i}|$ ). Значение второго параметра допускаются иметь в любых значений в пределах допуска  $2\pi$ . Решение подобных задач сводится к определению предельных отклонений составляющего и замыкающего размеров (в зависимости от типа задачи), а также к определению вероятностных характеристик распределения этих размеров. Существующие теории и методики расчета позволяют решать такие задачи.

Определение результирующего вектора в заданном направлении, рис. 3.3 (3, 5), например при расчете двух номинально несоосных отверстий осуществляется с помощью расчета проекции суммарного вектора  $\overline{A_z}$  на заданное направление.

К плоскостным размерным цепям относятся также комбинированные размерные цепи, которые имеют в своем составе векторные и скалярные звенья. На рис. 3.3(4, 5, 7) представлена цепь, которая позволяет оценить точности расположения поверхностей заготовки типа тело вращения. Такая цепь позволяет определить неравномерность припуска ( $Z_i$ ) для цилиндрических поверхностей, глубины и неравномерности цементируемого, или азотируемого слоя, определить неравномерность зазора в сборочных соединениях и т.п.

В технологических процессах и конструкциях изделий возникает необходимость определения величин смещения осей вращающихся деталей, которые фиксируются относительно неподвижных элементов конструкции. За один оборот детали происходит изменение значений смещения оси контролируемой детали в принятой контрольной точке.

Величина зазора и его неравномерность в компрессоре или турбине авиационного двигателя определяется по схеме, приведенной на рис. 3.3(7). Этот показатель точности непосредственно влияет на выходные характеристики изделия.

В приведенных линейных и плоскостных размерных цепях расчеты составляющих и замыкающих звеньев сводятся к определению двух предельных значений, модуля вектора и его вероятностных характеристик. Для плоскостных размерных цепей приведенного вида значения параметров вектора лежат в пределах минимального значения модуля вектора, равного нулю, и его максимального значения, равного радиусу рассеивания конца суммарного вектора  $\overline{A_z}$ .

Рассмотренные размерные цепи определяют частные задачи машиностроения. На рис. 3.3(8) представлена плоскостная векторная цепь общего вида. Данная цепь позволяет решать многие задачи для машиностроительного производства. При назначении опре-

деленных параметров этой векторной размерной цепи, или их исключения из общего вида она может отражать все выше представленные размерные цепи.

Геометрические параметры первого вектора отражают связь одной точки ( $O_1$ ) поверхности с другой точкой поверхности ( $O_2$ ), заданной в чертеже или эскизе детали. Эти точки отражают положение поверхностей в пределах одной детали или в пределах деталей сборочной единицы. Угловое расположение поверхностей проходящих через эти точки определяются в приведенной схеме угловым параметром цепи  $\beta_i$ . Вектор  $\overline{A}_i$  определяет последнее звено векторной плоскостной размерной цепи общего вида. Представленные составляющие вектора, данной размерной цепи, могут быть заданы любым, возможным способом назначения вектора на плоскости. Данная цепь решается в общей координатной системе  $X_0V_0$ , где суммарный вектор  $\overline{A}_z$ , является замыкающим звеном.

Частным случаем плоскостной размерной цепи является угловая размерная цепь. Принимая значения составляющих векторов, представленной цепи, равными нулю, получим угловую размерную связь, определяющей расположение поверхностей, проходящих перпендикулярно плоскостной цепи, которая отражает возможный поворот последней  $i$ -той плоскости, относительно начальной (нулевой).

Третьим видом размерных связей поверхностей деталей являются пространственные размерные связи. В процессе проектирования и изготовления изделий размерные связи между элементами поверхностей деталей выражаются в виде связей на плоскостях, а нанесение проекций или сечений в чертежах или операционных эскизах создают пространственное представление о положении этих элементов. По данному принципу построены и используются все компьютерные программы создания математических моделей в двухмерном и трехмерном пространстве.

Пространственные размерные цепи есть результат сочетания двух или нескольких плоскостных размерных цепей, расположенных относительно друг друга под некоторым углом  $\alpha$ . На рис.

3.3(9) представлена пространственная размерная цепь, определяющая расположение точки  $O_3$  двухзвенной размерной цепи, составляющие звенья которой расположены в различных плоскостях. Один вектор расположен в плоскости  $H$ , а второй вектор расположен в плоскости  $W$ . Эти плоскости перпендикулярны по отношению друг к другу и расположены под углом  $\alpha$ . Угол  $\alpha$  расположен в плоскости  $H$  и направлен против часовой стрелки относительно координаты  $V_1$  к координате  $V_2$ . В схеме принято условие, что первая координатная система совпадает с исходной координатной системой  $X_0Y_0Z_0$ . Нахождение и решение пространственной размерной цепи предусматривает неразрывность и замкнутость. Если при построении будет нарушено это условие, то результаты расчетов будут неправильными.

В этой связи переход от одной плоскости к другой строго определен. Он отражает порядок построения чертежей и способ нанесения размеров в чертежах и рабочих эскизах.

Если начало пространственной размерной цепи исходит из плоскости  $V$ , то последовательность движения по плоскостям будет следующей:

1. плоскость  $V$ , угол  $\alpha$  в плоскости  $x$ ,
2. плоскость  $H$ , угол  $\alpha$  в плоскости  $y$ ,
3. плоскость  $W$ , угол  $\alpha$  в плоскости  $z$  и т. д.

Если начало пространственной размерной цепи исходит из плоскости  $H$ , то имеет место «сдвиг» при выявлении последовательности при расчете размерной цепи, т.е.:

1. плоскость  $H$ , угол  $\alpha$  в плоскости  $y$ ,
2. плоскость  $W$ , угол  $\alpha$  в плоскости  $z$ ,
3. плоскость  $V$ , угол  $\alpha$  в плоскости  $x$ , и т. д.

Подобный «сдвиг» имеет место, если начало пространственной размерной цепи исходит из плоскости  $W$ .

### **3.3. Определение областей рассеивания составляющих звеньев размерных цепей**

От способа задания (координирования) и исполнения составляющих звеньев размерных связей в процессе изготовления изделий зависит форма области рассеивания концов векторов этих звеньев и конечном итоге – область рассеивания замыкающего звена. Поэтому анализ способов задания размеров в чертежах и в операционных эскизах и установление влияния их на область рассеивания имеет большое практическое значение.

Рассмотрим способы задания размеров в чертежах и операционных эскизах. Начало вектора примем совпадающим с началом координат.

Положение вектора на плоскости (его конца) можно задать в декартовой, полярной или комбинированной системе координат (например, в системе координат  $XU$ ). При задании вектора на плоскости в декартовой, полярной или другой системе участвуют два необходимых параметра (компоненты):

в декартовой – координаты  $A_x$  и  $A_y$ ,

в полярной – модуль вектора  $\overline{A_i}$  и угол  $\varphi_i$ , определяющий положение вектора в координатной системе  $x_i, y_i$ .

Для задания конца вектора на плоскости необходимо и достаточно иметь два параметра вектора. Имея четыре возможных параметра ( $A_x, A_y, \overline{A_i}$  и  $\varphi_i$ ) для задания плоскостного вектора, определим число возможных сочетаний из четырех элементов по два элемента:

$$C_n^m = \frac{n!}{m!(n-m)!};$$

При  $n=4, m=2$ , количество возможных сочетаний составит – 6.

Эти способы определяются следующими сочетаниями, табл. 3.1.

Т а б л и ц а 3.1

№ спо- соба	Параметры плоскостного вектора			
	$A_x$	$A_y$	$ A_i $	$\varphi_i$
1	<b>o</b>	<b>o</b>		
2	<b>o</b>		<b>o</b>	
3	<b>o</b>			<b>o</b>
4		<b>o</b>	<b>o</b>	
5		<b>o</b>		<b>o</b>
6			<b>o</b>	<b>o</b>

Приведенный перечень задания вектора включает декартовый, полярный и комбинированный способы.

Допуски, заданные на каждый из параметров, определяют, какая форма области, допустимого рассеивания положения концов векторов, будет на плоскости. Эти области имеют различный характер. Форма областей рассеивания может иметь выпуклую или вогнутую фигуру, в зависимости от способа задания вектора на плоскости.

Поскольку положение конца вектора на плоскости определяется двумя параметрами, геометрическая форма области рассеивания определяется сочетаниями областей рассеивания каждого параметра вектора. На рис. 3.4 представлены возможные области рассеивания на каждый из составляющих параметров плоскостного вектора.

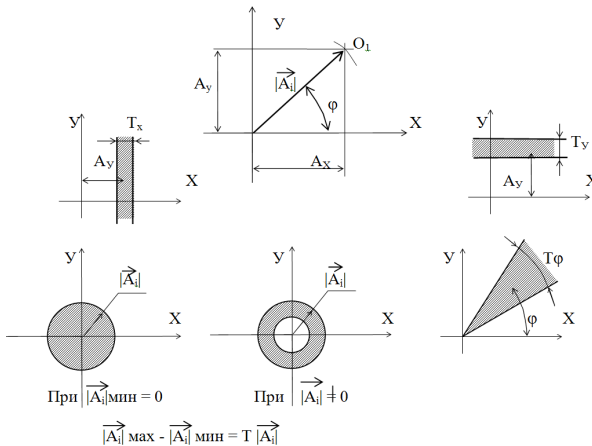


Рис. 3.4. Области рассеивания параметров вектора

В практике конструкторов и технологов машиностроительного производства используется также способ назначения допусков на несколько параметров вектора одновременно. Он определяется

специальным техническим условием в виде допустимого смещения относительно номинального положения и записывается в чертежах или эскизах в виде:

$$\boxed{+0,0... \text{ Б}}$$

Причем при любом способе задания вектора. Область рассеивания при этом на плоскости составляет окружность, в пространстве – шар, а при назначении такого условия на один линейный параметр – линию.

Сочетание перечисленных областей параметров вектора определяют соответственно ограниченные области рассеивания допустимых параметров вектора на плоскости. На рис. 3.5 представлены возможные области рассеивания векторов на плоскости в зависимости от способа задания вектора и назначении допусков на заданные параметры вектора.

При изготовлении деталей и сборочных единиц в производстве необходимо строго выполнять заданные значения параметров векторов и допустимых отклонений. Изменение способов задания размеров (параметров) и допусков влечет за собой искажение заданной формы области рассеивания. Это сказывается на выполнении качественных показателей изделия. Отсюда следует, что задание размеров и допусков определяют способ (метод) изготовления детали и сборочных единиц, а их замена приводит к необходимости ужесточать допуски на составляющие параметры для того, чтобы «вписаться» в заданную в чертеже область.

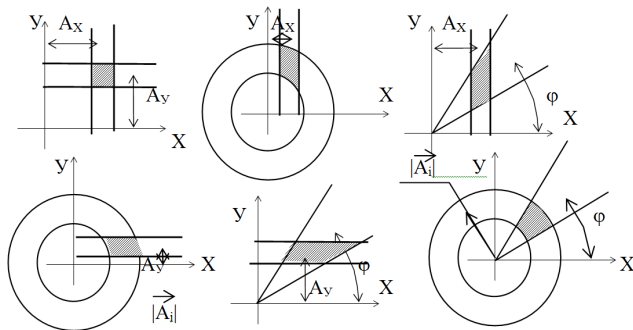


Рис. 3.5. Области рассеивания конца вектора

Например, замена области рассеивания заданная в чертеже детали в полярных координатах на декартовую, при изготовлении, создаст необходимость «вписаться» в заданную область чертежа, т. к. «описанная» область координатным способом будет иметь участки области не предусмотренные в чертеже.

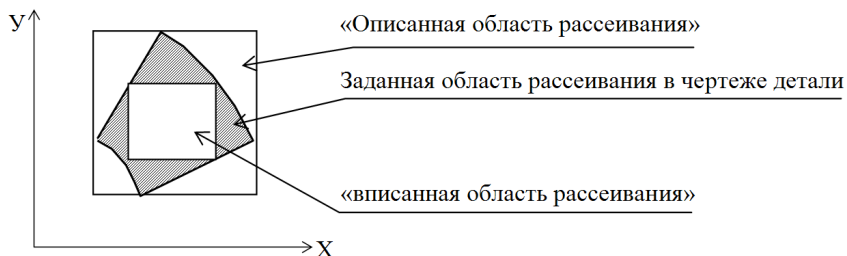


Рис. 3.6. Сравнение областей рассеивания плоскостного вектора

На рис. 3.6 представлена схема замены области рассеивания заданная в чертеже детали полярным способом на координатный способ при изготовлении.

В многозвенных размерных связях это отличие имеет весьма важное значение, так как искажение, суммарной области рассеивания достигает в отдельных случаях очень больших значений. Это искажение области приводит к увеличению сроков при освоении новых изделий и задерживает внедрение различных конструкторско-технологических мероприятий.

Рассмотрим механизм формирования суммарной области рассеивания линейных, плоскостных и пространственных размерных связей.

#### **3.4. Образование области рассеивания в размерных связях деталей, изделий и в технологических процессах**

При изготовлении и сборке машин имеют дело с различного рода участками поверхностей, плоскостей, линий или точек. Поверхности деталей, входящие в сборочную единицу, представляют собой участки плоской, цилиндрической, конической и другого вида поверхностей. Поверхность можно представить как совокупность всех последовательных положений некоторых перемещений линий



в пространстве. Образующие линии могут быть прямыми или кривыми.

Линия представляет собой траекторию движения точек на плоскости или в пространстве. Определяя положение поверхности относительно какой-либо другой поверхности или относительно системы координат, можно рассматривать расположение системы точек, образующих линии в пространстве, которые формируют поверхность; чтобы задать положение этой поверхности в пространстве относительно системы координат и функции, определяющей образование линий и поверхностей, проходящих через данную точку.

#### Рассмотрим линейную размерную цепь.

Область рассеивания суммарного (замыкающего) звена размерной цепи определяется суммой областей рассеивания составляющих звеньев. Это основное правило размерной линейной цепи выводится на основании разности, возможного максимального значения с возможным минимальным значением замыкающего звена, т.е. например:

$$A_{\Sigma \text{ max}} = a_{1 \text{ max}} - a_{2 \text{ min}} + a_{3 \text{ max}} - a_{4 \text{ min}}$$

$$A_{\Sigma \text{ min}} = a_{1 \text{ min}} - a_{2 \text{ max}} + a_{3 \text{ min}} - a_{4 \text{ max}}$$

---


$$A_{\Sigma \text{ max}} - A_{\Sigma \text{ min}} = a_{1 \text{ max}} - a_{1 \text{ min}} - a_{2 \text{ min}} + a_{2 \text{ max}} + a_{3 \text{ max}} - a_{3 \text{ min}} - a_{4 \text{ min}} + a_{4 \text{ max}}$$

или

$$A_{\Sigma \text{ max}} - A_{\Sigma \text{ min}} = (a_{1 \text{ max}} - a_{1 \text{ min}}) + (a_{2 \text{ max}} - a_{2 \text{ min}}) + (a_{3 \text{ max}} - a_{3 \text{ min}}) + (a_{4 \text{ max}} - a_{4 \text{ min}})$$

откуда

$$T_{\Sigma} = \Sigma T_1 + T_2 + T_3 + T_4$$

На основании этого принято основное правило линейной размерной цепи:

«Допуск замыкающего звена линейной размерной цепи равен сумме допусков составляющих звеньев», а также:

«Поле рассеивания замыкающего звена равно сумме полей рассеивания составляющих звеньев», т.е.:

$$\omega_{\Sigma} = \Sigma \omega_i$$

Этот вывод определяет возможность определять максимальные и минимальные отклонения на основании арифметической суммы значений составляющих звеньев. Для определения вероятностных

значений составляющих и замыкающих звеньев линейной размерной цепи необходимо знать законы распределения этих звеньев.

Рассмотрим пространственную размерную цепь.

На рис. 3.7А представлена векторная пространственная цепь, определяющая векторную связь начала и конца суммарного вектора, составляющие звенья которого заданы в своих координатных системах. Эти координатные системы повернуты относительно друг друга. В этой размерной связи присутствуют всевозможные способы задания составляющих векторов. Положение координатных систем составляющих векторов развернуты относительно друг друга под некоторыми угловыми параметрами.

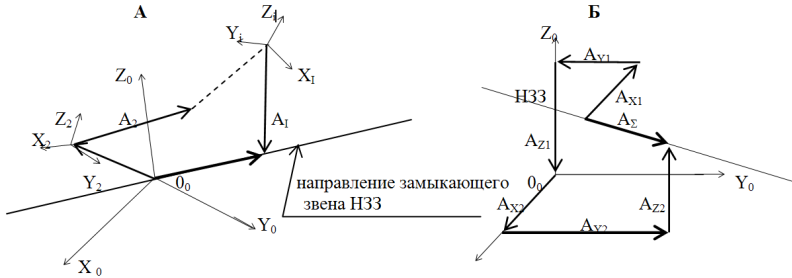


Рис. 3.7. Пространственные размерные цепи

Рассмотрим частный случай для пространственной размерной цепи. Примем условие, что все составляющие вектора совпадают с тремя пространственными координатами и имеют по два составляющих векторных звена. Параметры этих составляющих векторов, определяются одним параметром – модулем вектора. Второй параметр вектора, принимаем равным нулю.

Необходимо определить возможные значения замыкающего звена этой векторной цепи. Данная цепь определяет линию, расположенную в пространстве. На рис. 3.7Б представлена схема этой размерной цепи.

Определим расстояние  $A_{\Sigma}$  между началом и концом этого вектора.

Приняв искомое расстояние в качестве замыкающего звена размерной пространственной цепи, получим:

$$A_{\Sigma} = \sqrt{(A_{x1}^2 - A_{x2}^2) + (A_{y1}^2 - A_{y2}^2) + (A_{z1}^2 - A_{z2}^2)}.$$

Составляющие параметры цепи выполняются с заданными допусками и могут иметь наибольшие и наименьшие предельные значения. Поле рассеивания замыкающего звена  $\omega A_{\Sigma}$  представляет собой разность между наибольшим и наименьшим его предельными значениями:

$$\omega A_{\Sigma} = A_{\Sigma \max} - A_{\Sigma \min}.$$

Максимальное минимальное значения замыкающего звена размерной цепи определяются по формулам теории размерных цепей:

$$A_{\max} = \sqrt{(Ax1 \max - Ax2 \min)^2 + (Ay1 \max - Ay2 \min)^2 + (Az1 \max - Az2 \min)^2}$$

$$A_{\min} = \sqrt{(Ax1 \min - Ax2 \max)^2 + (Ay1 \min - Ay2 \max)^2 + (Az1 \min - Az2 \max)^2}$$

Тогда:

$$\omega A_{\Sigma} = \sqrt{(Ax1 \max - Ax2 \min)^2 + (Ay1 \max - Ay2 \min)^2 + (Az1 \max - Az2 \min)^2} - \sqrt{(Ax1 \min - Ax2 \max)^2 + (Ay1 \min - Ay2 \max)^2 + (Az1 \min - Az2 \max)^2}.$$

Анализ данного уравнения показывает, что поле рассеивания замыкающего звена зависит от полей рассеивания составляющих параметров, а также от величины размеров этих звеньев, т. е.

$$\omega A_{\Sigma} = f(\omega A_{X1}, \omega A_{X2}, \dots, \omega A_{Z1}, \omega A_{Z2}, \dots, A_{X1}, A_{X2}, \dots, A_{Z2}).$$

Эта функция показывает, что записать уравнение, в котором присутствовали только отклонения на заданные размеры (допуски), как это выполнено для линейных размеров, нельзя. В пространственных размерных цепях, при оценке величины замыкающего звена будет присутствовать размер, определяющий расположение этого звена в исходной системе координат.

В конструкциях машин и в технологических процессах производства часто при расчете пространственных размерных цепей приходится иметь дело с цепями, в которых минимальное значение замыкающего звена размерной цепи равно нулю. Так, при расчете размерных цепей для постановки трубопровода замыкающим звеном может быть зазор в соединении трубопровода со штуцером аг-

регата, где минимальный зазор принимается равным нулю. Разность между максимальным и минимальным значением определяет необходимость установки компенсирующего элемента, или необходимости произведения регулирования этого зазора. Принимая это условие запишем:

$$A\Sigma \min = \sqrt{(Ax1 \min - Ax2 \max)^2 + (Ay1 \min - AY2MAX)^2 + (aZ1MIN - aZ2MAX)^2} = 0$$

Это условие выполняется, если принять следующее равенство:

$$Ax1 \min = Ax2 \max,$$

$$Ay1 \min = Ay2 \max,$$

$$Az1 \min = Az2 \max.$$

Тогда поле рассеивания замыкающего звена будет равно:

$$\omega A\Sigma i \delta = \sqrt{(Ax1 \max - Ax2 \min)^2 + (Ay1 \max - Ay2 \min)^2 + (Az1 \max - Az2 \min)^2}$$

Значения  $A_{XMAX}$ ,  $A_{YMAX}$ ,  $A_{ZMAX}$  в уравнениях можно представить в следующем виде:

$$Ax1 \max = Ax1 \min + Tx1,$$

$$Ay1 \max = Ay1 \min + Ty1,$$

$$Az1 \max = Az1 \min + Tz1.$$

где  $T_{X1}$ ,  $T_{Y1}$ ,  $T_{Z1}$  - допуски на размеры  $A_{X1}$ ,  $A_{Y1}$ ,  $A_{Z1}$ .

Аналогично получим:

$$Ax2 \min = Ax2 \max - Tx2,$$

$$Ay2 \min = Ay2 \max - Ty2,$$

$$Az2 \min = Az2 \max - Tz2.$$

где  $T_{X2}$ ,  $T_{Y2}$ ,  $T_{Z2}$  - допуски на размеры  $A_{X2}$ ,  $A_{Y2}$ ,  $A_{Z2}$ .

Подставив данные значения в формулу по определению поля рассеивания замыкающего пространственного звена, получим:

$$\omega A\Sigma = \sqrt{(Tx1 + Tx2)^2 + (Ty1 + Ty2)^2 + (Tz1 + Tz2)^2}.$$

Данную формулу можно представить в общем виде, для любого числа составляющих звеньев, заданных координатным способом при условии, что координаты составляющих векторов параллельны друг другу:

$$\omega A\Sigma = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^n Txi\right)^2 + \left(\sum_{i=1}^n Tyi\right)^2 + \left(\sum_{i=1}^n Tzi\right)^2}.$$

Максимальное поле рассеивания замыкающего звена должно быть равно или меньше допустимого отклонения, тогда:

$$T_{\Sigma} = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^n T_{xi}\right)^2 + \left(\sum_{i=1}^n T_{yi}\right)^2 + \left(\sum_{i=1}^n T_{zi}\right)^2}.$$

Анализируя данную формулу, можно заметить, что при  $A_{\Sigma_{\min}}=0$  направление замыкающего звена пространственной размерной цепи совпадает с диагональю параллелепипеда, который определяет форму области рассеивания конца суммарного вектора замыкающего звена и является максимально возможной величиной при различных сочетаниях допусков и размеров координат. Необходимо отметить, что рассмотренный случай является частным случаем пространственной размерной цепи.

Для плоскостной размерной цепи подобный анализ позволяет определить формулу для определения величины замыкающего звена этой цепи, которая определяет диагональ прямоугольника. Направление замыкающего звена в этом случае совпадает с направлением диагонали. Если направление замыкающего звена не совпадает с направлением диагонали, то необходимо определять проекцию этой диагонали на направление замыкающего звена размерной цепи.

В координатной системе  $XU$  эта формула будет иметь следующий вид:

$$T_{\Sigma} = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^n T_{xi}\right)^2 + \left(\sum_{i=1}^n T_{yi}\right)^2}.$$

При разработке чертежей деталей сборочных единиц и технологических процессов применяют различные способы простановки размеров в различных проекциях, разрезах и сечениях. Поэтому показанные формулы для расчета составляющих и замыкающих звеньев размерных цепей встречаются довольно редко.

В отдельных случаях для расчета пространственных размерных цепей при различном расположении координатных систем составляющих звеньев можно использовать основное правило линейных размерных цепей, т. е:

$$T_{\Sigma} = \sum T_i$$

В этом случае все допуски на составляющие звенья размерных цепей, заданные любым способом, и имеющие различное расположение координатных систем должны быть ограничены условием:

«Допустимое смещение параметра вектора или вектора должно смещаться от номинального положения не более определенной заданной величины».

Такой способ задания, также является частным, как и показанный ранее. Этот способ не учитывает, или принимает равным нулю, возможных поворотов координатных систем в пределах заданных на эти угловые параметры допусков.

В этом случае, те отклонения, которые будут применяться в процессе назначения допусков при изготовлении деталей или изделий должны «вписать» рассеивания составляющих звеньев в заданную суммарную область.

Эта область для пространственной размерной цепи по форме является шаром, а для плоскостной размерной цепи – является окружностью.

Форма области рассеивания составляющего или замыкающего звена при повороте координатных систем в пределах заданного допуска изменяет свой характер. Эта область из выпуклой фигуры, может измениться и «приобрести» вогнутые участки. На рис. 3.8 представлена область рассеивания конца вектора заданная на плоскости (область 1) и имеет выпуклую фигуру в виде выпуклого прямоугольника. При повороте координат на угол  $T_\phi$  суммарная фигура области рассеивания будет иметь форму невыпуклой ограниченной фигуры. Эта фигура определяет предельное, возможное положение суммарной области рассеивания. Количество граничных точек области увеличивается до 12 (1, 2, 3, 4,  $1^1$ ,  $2^1$ ,  $3^1$  и  $4^1$ ), а также, за счет пересечения линейных участков областей появляются дополнительные точки – 5, 6, 7, 8. Между точками  $1-1^1$ ,  $2-2^1$ ,  $3-3^1$  и  $4-4^1$  появляются криволинейные участки, в зависимости от радиуса поворота.

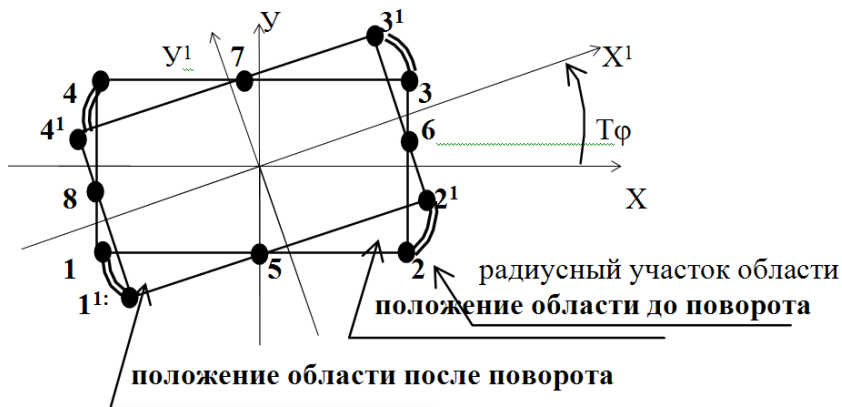


Рис. 3.8. Изменение области рассеивания плоскостной размерной цепи за счет угла поворота  $\Gamma_\phi$

### 3.5. Определение граничных точек областей рассеивания составляющих векторов.

На первом этапе расчета области рассеивания плоскостной размерной цепи определяются граничные точки областей первых двух составляющих векторов. Предельные значения параметров можно найти по заданным отклонениям. Например, для параметра  $X$  – по формулам:

$$X_{\min} = A_x + EI_x$$

$$X_{\max} = A_x + Es_x.$$

где  $A_x$  – номинальное значение параметра  $X$ ;

$EI_x$  – нижнее отклонение параметра  $X$ ;

$Es_x$  – верхнее отклонение параметра  $X$ .

Для облегчения суммирования и возможности автоматизации расчетных работ нумерация вершины многоугольников, аппроксимирующих область, ведется против часовой стрелки (см. рис. 3.9).

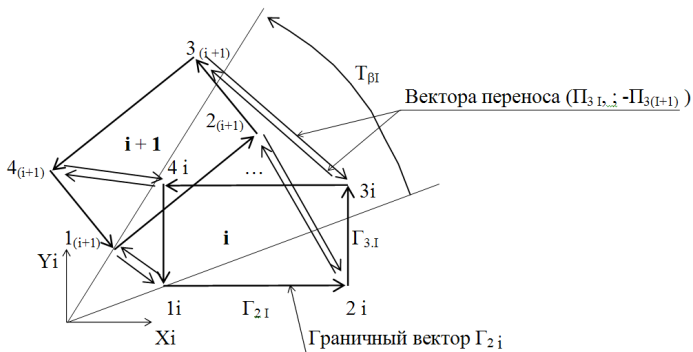


Рис. 3.9. Схема формирования области рассеивания составляющего звена

На рис. 3.9 представлен один этап поворота начальной ( $i$ -ой) области рассеивания в положение  $(i+1)$ . Этот поворот зависит от допуска ( $T_{\beta i}$ ) на угловой размер  $\beta_i$ . В процессе поворота формируются новые границы суммарной области рассеивания. Границы суммарной области определяются возможными начальными граничными векторами и вновь образованными (векторами переноса  $\Pi$ ). Эти вектора определяются радиусами поворота каждой точки исходной области рассеивания. Для определения суммарной области рассеивания на дуге переноса граничных точек необходимо производить аппроксимацию и определять точки, лежащие на этой дуге с необходимой точностью расчета. Шаг аппроксимации  $\Delta\beta$ , определяется по формуле:

$$\Delta\beta = 2\text{arcCos}\left(1 - \frac{\delta_n}{A}\right).$$

где  $A$  – радиус окружности;

$\delta_n$  – стрелка прогиба.

Точность расчета определяется коэффициентом аппроксимации – отношением  $\delta_n$  к допуску  $T[A]$ . Мера точности расчета определяется по формуле:

$$Cn = \frac{\delta_n}{T[A]}.$$

где  $T[A] = [A]_{\max} - [A]_{\min}$ .



Минимальный угол аппроксимации  $\Delta\beta=\gamma$  можно найти по формуле:

$$\gamma = 2 \arccos \left[ 1 - C_n \left( \frac{[A]_{\min}}{[A]_{\max}} \right) \right].$$

Сочетание предельных значений параметров составляющего вектора создают основные граничные точки области рассеивания плоскостной размерной цепи. В табл. 3.2 представлены значения параметров составляющих векторов и значения граничных точек в зависимости от способа задания вектора на плоскости.

Т а б л и ц а 3.1

Номер способа	Параметры вектора				Граничные точки области с номерами			
	Ax	Ay	[A]	φ	1	2	3	4
1	0	0			X <sub>мин</sub> , Y <sub>мин</sub>	X <sub>маx</sub> , Y <sub>мин</sub>	X <sub>маx</sub> , Y <sub>маx</sub>	X <sub>мин</sub> , Y <sub>маx</sub>
2	0		0		X <sub>мин</sub> , [A] <sub>мин</sub>	X <sub>маx</sub> , [A] <sub>мин</sub>	X <sub>маx</sub> , [A] <sub>маx</sub>	X <sub>мин</sub> , [A] <sub>маx</sub>
3	0			0	X <sub>мин</sub> , φ <sub>мин</sub>	X <sub>маx</sub> , φ <sub>мин</sub>	X <sub>маx</sub> , φ <sub>маx</sub>	X <sub>мин</sub> , φ <sub>маx</sub>
4		0	0		Y <sub>мин</sub> , [A] <sub>мин</sub>	Y <sub>маx</sub> , [A] <sub>мин</sub>	Y <sub>маx</sub> , [A] <sub>маx</sub>	Y <sub>мин</sub> , [A] <sub>маx</sub>
5		0		0	Y <sub>мин</sub> , φ <sub>мин</sub>	Y <sub>маx</sub> , φ <sub>мин</sub>	Y <sub>маx</sub> , φ <sub>маx</sub>	Y <sub>мин</sub> , φ <sub>маx</sub>
6			0	0	[A] <sub>мин</sub> , φ <sub>мин</sub>	[A] <sub>маx</sub> , φ <sub>мин</sub>	[A] <sub>маx</sub> , φ <sub>маx</sub>	[A] <sub>маx</sub> , φ <sub>маx</sub>

Для областей, заданных способами № 1, 3, 5, этих точек достаточно, чтобы оценить предельную область рассеивания составляющих векторов плоскостной размерной цепи, так как характер фигуры этих областей выпуклый. Для способов №2, 4, 6 задания основных граничных точек области недостаточно, так как четыре граничные точки не дают полного представления о фигуре области.

Например, для способа №6 фактическая фигура области рассеивания есть часть кольца. Четыре граничные точки, соединенные прямыми линиями, создают представление о фигуре в виде трапеции. Для способов задания №2, 4, 6, на радиусных участках границы, между основными точками производится аппроксимация участков окружности. Эта аппроксимация производится в зависимости от необходимой (заданной) точности расчета.

Для седьмого способа задания с помощью технического условия: «допустимое смещение конца вектора не более заданной величины» область рассеивания составляет окружность на плоскости, поэтому необходимо производить аппроксимацию радиусного участка, который равен длине окружности в соответствии с формулами:

$$X_i = A_x + \frac{T[A]}{2} \cos(\varphi + \gamma),$$

$$Y_i = A_y + \frac{T[A]}{2} \sin(\varphi + \gamma).$$

где  $A_x, A_y$  – координаты конца вектора-номинала;

$\varphi$  – угол между вектором номиналом и осью  $OX$ ;

$\gamma$  – минимальный угол аппроксимации.

За первую граничную точку области рассеивания принимается точка с минимальными значениями модуля вектора, т. е.:

$$[A]_{\min} = [A]_{\text{ном}} + EI[A].$$

Часто при расчете области рассеивания необходимо производить оценку в прямоугольной или полярной системе. В этом случае производится пересчет граничных точек области рассеивания.

На втором и последующих этапах расчета области суммарного вектора имеет место, как минимум два положения, ( $i$ ) и ( $i+1$ ) см. рис. 3.9. В этом случае производится расчет всех точек области рассеивания, которые находятся на границе суммарной области, и внутри этой области. Используя правило, что при переносе области из одного положения в другое в каждом конце вектора имеют место два входящих и два выходящих вектора, производится проверка принадлежности этих векторов суммарной предельно расчетной области. Характер этой области представляет собой сложную плоскостную фигуру, которая имеет выпуклые и вогнутые участки.

Для расчета пространственных размерных цепей необходимо учитывать способы задания векторов на плоскости и перехода с помощью угловых параметров в другие проекции, сечения или разрезы в соответствии с созданием объемной трех мерной пространственной математической модели. Последовательность переходов, при расчете области рассеивания пространственной размерной цепи, изложены выше. Область рассеивания таких цепей представляет собой сложную объемную фигуру с выпуклыми и вогнутыми участками. Такую фигуру с расчетными значениями необходимо рассматривать по проекциям или сечениям области при проектировании изделия или технологического процесса.

На основании теоретических исследований и создании методов расчета пространственных размерных цепей разработана программа определения фактической области рассеивания суммарной векторной многозвенной размерной цепи.

Для оценки вероятностных характеристик рассеивания в суммарной области множества точек концов векторов разработана схема и создана программа «вектор». В основу этой программы положен имитационно - статистический способ определения концов векторов в расчетной области. Имитация выполняется на основании композиционных законов распределения составляющих параметров векторов и их положения в пространстве или на плоскости. Композиционный закон распределения принят исходя из соотношения систематических и случайных составляющих. Мера вклада систематических составляющих в заданное поле рассеивания определяется на основании формулы:

$$\mu = \frac{a}{\omega}.$$

где  $a$  – систематическая часть производственной погрешности,

$\omega$  – полное поле рассеивания производственных погрешностей.

Мера рассеивания  $\mu$  колеблется в пределах:

$$0 \leq \mu \leq 1$$

При значении  $\mu=0$  закон распределения производственных погрешностей по всему полю рассеивания подчиняется нормальному закону.

При значении  $\mu=1$  закон распределения производственных погрешностей соответствует равномерному распределению.

На основании значительных исследований, в различных отраслях машиностроительного производства установлено, что данная величина  $\mu$  соответствует числовым значениям от 0,3 до 0,4. В отдельных случаях эта величина может отличаться. Так, например, при вертикальной сборке изделий с гарантированным зазором в соединении, эта величина меньше чем при горизонтальной сборке такого же соединения. Это объясняется наличием весовой характеристики собираемых деталей.

Данная программа «Вектор», представлена в компьютерном виде и позволяет производить расчет суммарной области при любых сочетаниях и способах задания векторных составляющих звеньев. В программе можно использовать, как стандартные соотношения величины  $\mu$ , так и изменять эти значения в пределах от 0 до 1.

На рис. 3.10 представлена последовательность решения плоскостной задачи с использованием компьютерной программы «Вектор» даны возможные варианты положения фактической области, относительно заданной.

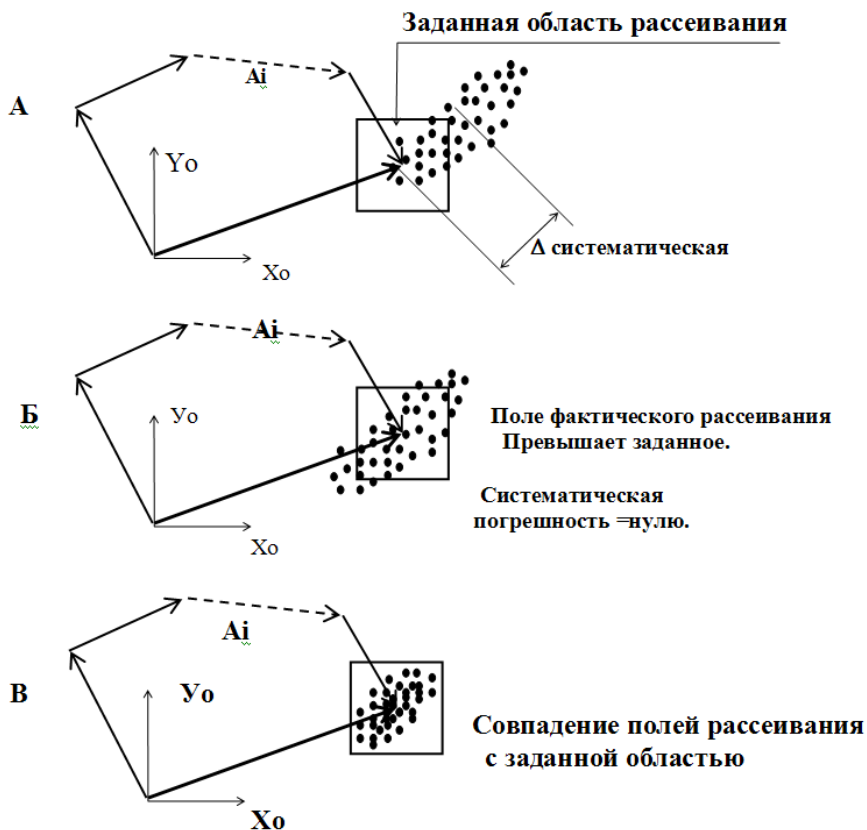


Рис. 3.10. Возможные варианты взаимного расположения расчетной, и заданной областей рассеивания суммарного вектора размерной цепи

## ГЛАВА 4. ОБРАБОТКА ЗАГОТОВОК НА НАСТРОЕННОМ ОБОРУДОВАНИИ

### 4.1. Методы достижения точности при обработке заготовок

Обработка заготовок на машиностроительном оборудовании производится с использованием различных средств оснащения. В зависимости от вида оборудования, приспособлений и инструментов заданная точность параметров достигается различными методами.

Способы установки заготовки, характер базирования ее в технологической системе, возможности оборудования и инструмента, а также назначение параметров и допусков, заданных для выполнения этой операции, определяет метод достижения точности.

В машиностроительном производстве используются следующие методы достижения точности при обработке заготовок:

1. Обеспечения точности параметров заготовок пробными проходами и промерами.
2. Обеспечение точности параметров заготовок в автоматическом или полуавтоматическом режиме.
3. Обеспечение точности параметров заготовок комбинированным методом.

**Первый метод** достижения точности (метод пробных проходов), обычно используется мелкосерийном или индивидуальном производстве с использованием универсального оборудования и оснастки. Этот метод обладает невысокой производительностью, требует использования высококвалифицированных рабочих, но позволяет обеспечивать довольно высокую точность заданных параметров заготовок.

На рис. 4.1 представлена схема установки заготовки в технологической системе. При обработке которой необходимо обеспечить операционный размер  $A_{1.2}$ . Допуск на заданный геометрический параметр имеет значение  $T_{1.2}$ .

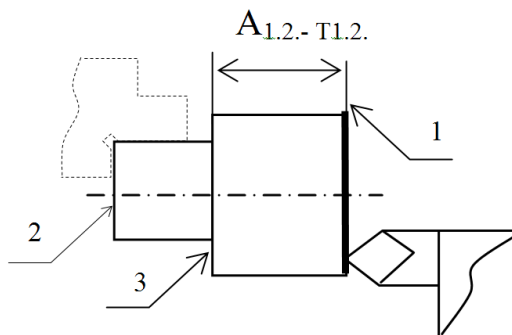


Рис. 4.1. Положение заготовки в технологической системе

В примере показаны четыре вида поверхностей заготовки:

1. Обрабатываемая поверхность заготовки (поверхность 1);
2. Измеряемая поверхность заготовки (поверхность 1);
3. Измерительная поверхность заготовки (поверхность 3);
4. Установочная поверхность заготовки (поверхность 2).

В нашем примере 1, является обрабатываемой и измеряемой поверхностью операционный размер  $A_{1,2}$  задан относительно измерительной поверхности 3. Измерительная поверхность 3 не совмещена с установочной поверхностью 2. Такое базирование заготовки и простановка операционного размера, создают неопределенность положения измерительной поверхности 3 в технологической системе. Для достижения заданного размера  $A_{1,2}$  может потребоваться метод пробных проходов и промеров. Применение метода обработки будет определяться величиной суммарной погрешности, которая зависит от нескольких исходных составляющих:

1. От погрешности между установочной и измерительной поверхностями, и если эта погрешность расположение превышает заданный допуск на операционный размер  $A_{1,2}$ ;
2. От погрешностей возникающих в процессе резания металла;
3. От погрешностей связанных с установкой и закреплением заготовки и т.п.

В этом случае, выполнить операционный размер  $A_{1,2}$  можно только методом пробных проходов.

Достижение заданной точности операционного размера в этом случае будет выполняться в следующей последовательности:

- 1) Проведение контроля размера исходной заготовки и определение величины слоя металла, необходимого для удаления с поверхности 1.
- 2) Определение количества проходов при обработке поверхности 1 для использования оптимальных режимов обработки.
- 3) Установка, с помощью контрольного устройства станка (лимба) режущего инструмента в рабочее положение и проточка поверхности 1 на небольшом участке заготовки.
- 4) Контроль параметра заготовки на проточенном участке и проведение необходимой корректировки положения режущего инструмента, если есть в этом необходимость.
- 5) Обработка поверхности 1 и контроль выполнения заданного параметра.

Из приведенного примера видно, что данный метод пробных проходов требует значительной трудоемкости, которая определяется большим количеством измерений заготовки в процессе обработки, остановки оборудования, расчетов величины удаляемого припуска и регулировки положения инструмента в технологической системе и т. п. Эти условия определяют возможности и место использования его в машиностроительном производстве.

**Второй метод** достижения точности используется в крупносерийном и массовом производстве и предусматривает непрерывное, последовательное обеспечение заданной точности у партии заготовок. Для использования этого метода необходимо обеспечивать определенные условия на операциях технологического процесса изготовления заготовок.

Процесс проведения этого метода можно условно разделить на два этапа:

Первый этап заключается в наладке и настройке станка (оборудования) на заданные настроечные размеры.

На первом этапе осуществляется **статическая настройка** станка на заданные операционные размеры или расчетные настроечные размеры. Эта настройка заключается в установке режущего ин-

струмента, управляющих программ для станков с ЧПУ, или установка ограничителей (упоров) движения суппортов станка в технологической системе и т.п.

После обработки небольшой, пробной партии заготовок, (желательно обработку производить на образцах), выполняется контроль действительных размеров заготовок. Учитывая изменения, появившиеся в процессе обработки партии заготовок, осуществляется **динамическая настройка**, которая заключается в коррекции настроечных размеров с помощью корректирующих устройств станка или регулировки ограничителей движения инструмента в технологической системе. Коррекция проводится с учетом оптимального размещения режущих инструментов в технологической системе для обработки партии качественных заготовок.

Обычно, первый этап работы выполняет высококвалифицированный рабочий-наладчик.

Второй этап работы заключается в обработке партии заготовок рабочим оператором. При использовании станков автоматов, полуавтоматов, обрабатывающих центров, многоцелевых станков, и других станков снабженных компьютерными системами и автоматическими устройствами, часть работ может выполняться этими робототехническими устройствами или комплексами.

Обработку партии заготовок осуществляет автоматическое устройство станка или оператор. Периодически, по мере изменения параметров в партии обрабатываемых заготовок, производится контроль и необходимая корректировка положения инструмента, или его смена.

### **Комбинированный метод обеспечения точности параметров заготовок.**

Этот метод используется в том случае, если часть операционных размеров невозможно выполнить по схеме автоматического метода достижения точности. Желательно, чтобы количество таких размеров было минимально необходимым и достаточным при выполнении операции технологического процесса. Все остальные заданные операционные размеры должны выполняться в автоматическом или полуавтоматическом режиме обработки.



Определение условий, необходимых для использования метода автоматического или полуавтоматического обеспечения заданных параметров точности рассматривается при расчете настроечных и исполнительных размеров.

#### **4.2. Технологические схемы точности при обработке поверхностей заготовок**

При разработке технологических процессов производства заготовок важным условием при обработке является выбор базовых установочных поверхностей и их подготовка, наличие хороших измерительных поверхностей и способ назначения операционных размеров и технических требований.

Для выполнения этих условий при разработке технологических процессов ставится ряд задач:

- 1) Обеспечить точное ориентирование заготовки в технологической системе;
- 2) Обеспечить надежное закрепление заготовки;
- 3) Обеспечить необходимые условия для контроля обрабатываемых поверхностей;
- 4) Правильно назначить операционные размеры, создав условия по обеспечению обработки поверхностей заготовки в автоматическом или полуавтоматическом режиме.

Для станков с автоматическими устройствами, для станков ЧПУ условие обеспечения операционных размеров в автоматическом режиме является **обязательным**, так как в процессе обработки заготовок оператор не вмешивается в процесс достижения заданной точности.

В случае невозможности выполнения операционного размера в автоматическом режиме необходимо производить различные дополнительные работы. Производить выверку заготовки на станке относительно разметочной риски или других элементов заготовки. При выверке заготовки относительно разметочных рисков в качестве установочной поверхности выступает риска, а установочная поверхность, теряет смысл как базовая. Такие примеры при обработке

заготовок в машиностроительном производстве встречаются довольно часто.

С целью систематизации возможных вариантов базирования заготовок в технологической системе и назначении операционных размеров рассмотрим технологические схемы достижения точности при обработке заготовок на станках и другом оборудовании.

#### 4.2.1. Технологические схемы точности

**Первая технологическая схема** предусматривает проведение обработки двух или нескольких поверхностей в одной операции при одной установке и закреплении заготовки в технологической системе. На рис. 4.2 (переход 2) заданный операционный размер  $A_{1,2}$  выполняется по первой технологической схеме. В состав параметров определяющих операционный размер  $A_{1,2}$  входят размеры,  $a_{o1}$  и  $a_{o2}$ .

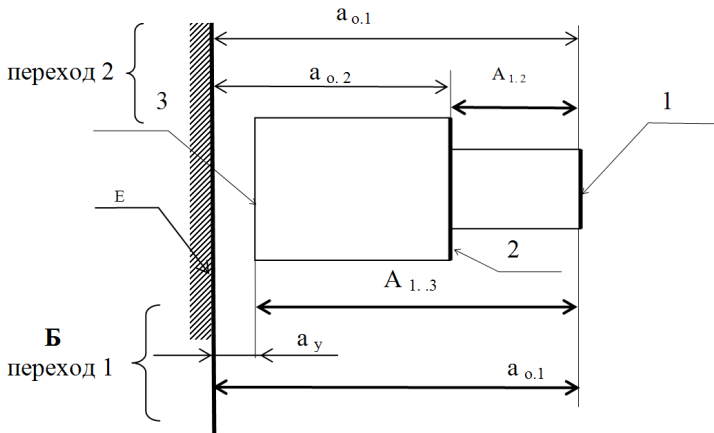


Рис. 4.2. Технологические схемы обработки

Данные размеры связывают обрабатываемые поверхности 1 и 2 с установочной поверхностью  $E$  приспособления. Поверхность  $E$  является исходной базой, относительно которой производится установка и обработка партии заготовок. Эта поверхность определяет положение координатной системы, в которой формируются параметры заготовки. Выполнение этих параметров осуществляется

в автоматическом режиме на настроенном станке. Обработка ведется по разработанной программе, и движение подвижных элементов станка ограничивается командами управляющей программы или концевыми выключателями или упорами станков и другими средствами ограничения движений подвижных элементов в технологической системе.

В процессе обработки поверхностей 1 и 2 размеры  $a_{o1}$  и  $a_{o2}$  в партии заготовок будут изменяться, и создавать соответственно погрешности  $\Delta_{o1}$ ,  $\Delta_{o2}$ . Величины этих погрешностей зависят от многих случайных и систематических факторов, проявляющихся в процессе резания материала заготовки. Так на величину размеров,  $a_{o1}$  и  $a_{o2}$  и соответственно на величину погрешностей  $\Delta_{o1}$   $\Delta_{o2}$  будут оказывать влияние неравномерности удаляемого припуска, неравномерность твердости обрабатываемого материала, жесткость технологической системы, износ режущего инструмента, режимы резания и другие факторы. Данные величины соответственно определяют поля рассеивания составляющих размеров,  $a_{o1}$  и  $a_{o2}$ . В связи с этим операционный размер  $A_{1,2}$ , который выполняется по первой технологической схеме будет определяться уравнением:

$$A_{1,2} - a_{o1} + a_{o2} = 0;$$

или

$$A_{1,2} = a_{o1} - a_{o2},$$

тогда для линейных размерных связей будем иметь:

$$\Delta_{1..2} = \Delta_{o1} + \Delta_{o2}$$

$$\omega_{1..2} = \omega_{o1} + \omega_{o2}$$

Допустимые значения операционного размера  $A_{1,2}$  и соответствующее поле рассеивания размеров в партии обрабатываемых заготовок будут определяться условием:

$$\omega_{1..2} = \omega_{o1} + \omega_{o2} \leq T_{1,2} \leq \text{заданное числовое значение.}$$

где  $T_{1,2}$  - допуск на заданный операционный размер  $A_{1,2}$ .

**Вторая технологическая схема**, рис. 4.2 Б (переход 1) предусматривает выполнение операционного размера  $A_{1,3}$ . Этот размер связывает обрабатываемую поверхность 1 заготовки с установочной поверхностью 3. При анализе данной технологической схемы

видно, что в состав параметров, определяющих выполнение операционного размера  $A_{1.3}$  входят размеры определяющие установку заготовки в технологической системе  $a_u$  и размер  $a_{o.1}$ , который связан с процессом обработки поверхности 1. Размер  $a_y$  зависит от плотности прилегания установочной поверхности заготовки к установочной поверхности приспособления, тщательности подготовки установочных поверхностей, контролю величин этих составляющих, воздействию силовых факторов при закреплении заготовки и других параметров.

Операционный размер  $A_{1.3}$ , в этом случае, будет определяться уравнением:

$$A_{1.3} - a_{o.1} + a_y = 0,$$

так как  $A_{1.3}$  является замыкающим звеном представленной размерной связи, то:

$$A_{1.3} = a_{o.1} - a_y,$$

тогда:

$$\Delta_{1.3} = \Delta_{o.1} + \Delta_y,$$

$$\omega_{1.3} = \omega_{o.1} + \omega_y \leq T_{1.3} \leq \text{заданное числовое значение поля допуска}$$

**Третья технологическая схема** обеспечения точности расположения двух или нескольких поверхностей предусматривает проведение обработки в разных операциях технологического процесса. (Процесс дифференциации операций технологического процесса). При выполнении этих операций используется одна, постоянная технологическая базовая поверхность 3 заготовки.

На рис. 4.3 рассматривается обработка поверхностей 1 и 2 в разных операциях технологического процесса. Поверхность 1 обрабатывается в операции №1, а поверхность 2 обрабатывается в операции № 2.

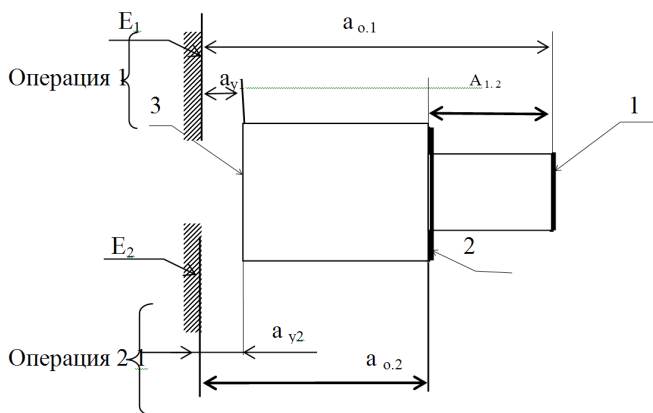


Рис. 4.3. Третья технологическая схема обработки

Заготовка при установке и закреплении на операции №1 ориентируется в осевом направлении по поверхности 3. В качестве установочной поверхности приспособления используется поверхность  $E_1$ . В этом случае формирование поверхности 1 в технологической системе зависит от размеров, связанных с установкой (размер  $a_{y1}$ ) и размером, связанным с процессом обработки (размером  $a_{o1}$ ).

При выполнении операции №2 формирование поверхности 2 осуществляется в другой технологической системе и зависит от размеров связанных с установкой и закреплением  $a_{y2}$  и размером  $a_{o2}$  определяемым процессом обработки поверхности 2. В связи с этим выполнение операционного размера  $A_{1,2}$  определяется уравнением размерных связей:

$$A_{1,2} - a_{o1} + a_{y1} - a_{y2} + a_{o2} = 0.$$

В этом уравнении размер  $A_{1,2}$  является замыкающим звеном размерной цепи,

тогда:

$$A_{1,2} = a_{o1} - a_{y1} + a_{y2} - a_{o2}.$$

В соответствии с основным правилом линейных размерных связей имеем:

$$\Delta_{12} = \underbrace{\Delta_{o1} + \Delta_{y1}}_{\Delta_1} + \underbrace{\Delta_{o2} + \Delta_{y2}}_{\Delta_2}$$

где  $\Delta_1$  – суммарная погрешность, полученная на операции № 1,  
 $\Delta_2$  – суммарная погрешность, полученная на операции № 2.

Предельное поле (область) рассеивания операционного размера  $A_{1,2}$  определяется суммой составляющих параметров, т. е.

$$\omega_{1..2} = \omega_{o1} + \omega_{y,1} + \omega_{y..2} + \omega_{o2} \leq T_{1,2} \text{ числовое значение допуска}$$

При этом условии фактические значения операционных размеров не должны выходить за пределы  $A_{1,2max}$  и  $A_{1,2min}$ .

**Четвертая технологическая схема** обеспечения точности расположения двух или нескольких поверхностей предусматривает проведение обработки этих поверхностей в разных операциях технологического процесса. В этом случае для установки заготовок в технологической системе используются различные базовые установочные поверхности заготовки, т.е. имеет место непостоянство баз в технологическом процессе.

На рис. 4.4 представлена четвертая технологическая схема.

Поверхность 1 обрабатывается в операции №1 и при этом заготовка устанавливается по базовой установочной поверхности 3 заготовки. Поверхность 2 обрабатывается в операции №2, а заготовка устанавливается по базовой установочной поверхности 4. Соответственно в операциях №1 и №2 в качестве установочных поверхностей приспособлений выступают поверхности  $E_1$  и  $E_2$ .

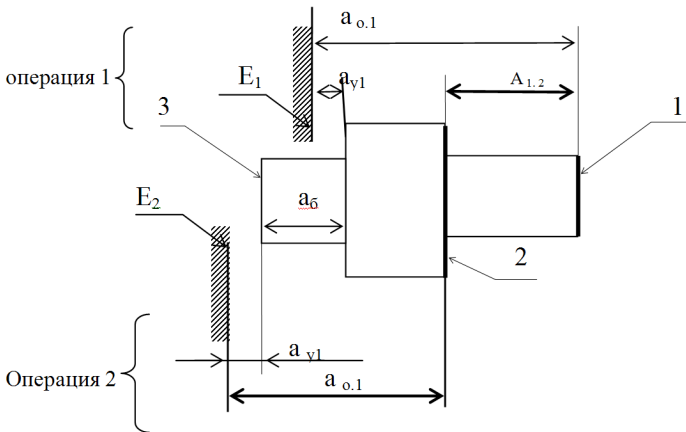


Рис. 4.4. Четвертая технологическая схема обработки поверхностей

Подобные технологические схемы для обработки различных поверхностей заготовок существуют и для векторных составляющих размерных связей в технологических системах.

Эти схемы, позволяют производить анализ, возможностей использования различных методов достижения заданной точности в технологических процессах. Рассчитывать настроечные размеры и производить оптимизацию исполнения отдельных операций, и всего технологического процесса производства деталей и сборочных единиц.

При изготовлении трубопроводов в автоматическом или ручном исполнении также действуют методы достижения точности, приведенные в данном параграфе.

## **ГЛАВА 5. ТРУБОПРОВОДЫ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ**

### **5.1. Виды трубопроводов**

Исходя, из назначения, трубопроводы ГТД можно разделить на следующие группы:

1. Трубопроводы топливной системы;
2. Трубопроводы охлаждения;
3. Трубопроводы системы смазки;
4. Трубопроводы электросистемы;
5. Газотрубопроводы.

По форме, размерам и способам соединения трубопроводы отличаются многообразием: прямые, изогнутые, гофрированные и гладкие, тонкостенные и толстостенные.

1. Основными типами соединения трубопроводов являются:
2. Штуцерные;
3. Ниппельные;
4. Соединения с уплотнительными кольцами;
5. Фланцевые;
6. Гибкие.

Штуцерное соединение трубопроводных систем или соединение трубопроводов с агрегатами имеет основные элементы: труба; ниппель; уплотнитель; накидная гайка; штуцер; элемент тубы или агрегата.

При сборке данного соединения выполняется важная задача по обеспечению плотного соединения уплотнительного элемента по рабочим плоскостям штуцера и ниппеля трубопроводной системы.

В процессе эксплуатации изделия трубопроводные системы воспринимают значительные силовые, температурные и динамические воздействия, вызванные внутренним давлением по всей толщине стенки трубопровода.

Разница в уровне температур различных частей корпуса двигателя и трубопровода, закрепленного на нем, приводят к деформации трубопровода вследствие разных температурных удлинений корпуса и трубопровода.

Таблица 5.1

**Виды нарушения соединения трубопроводов, вызванные производственными погрешностями при изготовлении и сборке элементов сборочных единиц**

№№	Виды нарушения	Причины дефекта	Характер дефекта
1	Неплотное прилегание уплотнителя в соединительном стыке.	Недотяг при сборке	Нарушение герметичности.
2	Неравномерное прилегание уплотнителя в соединительном стыке.	Перекося осей	Нарушение герметичности, течь. Деформация трубопровода.
3	Неравномерное прилегание уплотнителя в соединительном стыке.	Смещение осей	Концентрация напряжений в соединении.
4	Неравномерное прилегание уплотнителя в соединительном стыке.	Перекося и смещение осей. Торцевое биение рабочих поверхностей ниппеля или штуцера. Перекося и смещение осей и торцевое биение рабочих поверхностей ниппеля или штуцера.	Наличие опасного сечения.



## 5.2. Процесс формирования профиля труб

Процесс изготовления трубопроводных систем является сложным, так, как предусматривает часто расположение элементов в пространстве и необходимости обеспечивать при изготовлении большое количество параметров качества в пределах высокой точности.

При изготовлении труб, деталей трубопроводов, штуцерного соединения и последующей сварки или пайки элементов конструкции возникают производственные погрешности изготовления. При установке трубопроводов на изделие и соединение их с агрегатами возникают сборочные монтажные погрешности.

Взаимодействие производственных погрешностей изготовления и монтажа трубопроводов определяет возможный характер соединений, герметичность в стыках, напряженное состояние трубопроводов и его элементов.

От качества изготовления и соединения трубопроводов в большой степени зависит эксплуатационная надежность трубопроводной системы изделия.

Специфические особенности работы трубопроводных систем ГТД предусматривают использование высококачественных материалов для изготовления труб и арматуры к трубопроводным системам. Внутренняя поверхность труб находится под воздействием агрессивных жидкостей и газов. Действия окружающей среды: обливов маслом, топливом, коррозионные воздействия, особенности воздействия климатических условий разных широт земного шара, широкий диапазон изменения температур, окружающей среды (от  $-60^{\circ}$  до  $+750^{\circ}\text{C}$  и выше) все это требует тщательного выбора материалов для трубопроводов ГТД.

Наибольшее распространение в конструкции трубопроводных систем отечественных ГТД получили трубы из нержавеющей аустенитной стали X18H10T. Сталь с пределом прочности  $50-60 \text{ кгс/мм}^2$  обеспечивает предел выносливости гладкой трубы в зависимости от качества наружной поверхности в пределах  $23-27 \text{ кгс/мм}^2$ .

Данная сталь обладает высокой пластичностью и позволяет производить гибку и развальцовку труб без подогрева. Этот материал хорошо сваривается и обладает высокими антикоррозионными свойствами. Толщина стенок труб принимается менее 1 мм. Этот материал используется для трубопроводов внешней коммуникации ГТД. Химический состав стали X18H10T следующий: углерод - 0,12%, марганец – 1,0-2,0%, хром - 17,0-19,0%, никель - 9,0-11,0%, титан - 0,7%, основа железо. Для работы труб в более тяжелых условиях эксплуатации используются более жаростойкие и жаропрочные материалы, в частности сплав ВЖ98.

Стремление уменьшить габаритные размеры соединений увеличило концентрацию напряжений в стыковых соединениях и радиусы переходов поверхностей арматуры выполняются с малыми значениями, равными 0,2-0,6 мм. Для деталей арматуры используются высокопрочные стали и титановые сплавы. Для обеспечения хороших условий сборки и разборки стыковых элементов трубопровода широко используются гальванические покрытия кадмием, цинком, медью и серебром.

Поверхности труб подвергаются травлению для выявления поверхностных дефектов - трещин, волосовин, закатов и других дефектов. При травлении используются различные растворы. Например, для травления нержавеющей сталей применяется растворы из серной кислоты 80-100 гр/л, азотной кислоты 130-140 гр/л, плавиковой кислоты 40 гр/л и воды 50 гр/л. В этом растворе при комнатной температуре производят травление труб в течение 20 минут. Для нейтрализации используют однопроцентный раствор тринитрофосфата в течение 5-10 минут или раствор кальцинированной соды 30-50 гр/л.

После сварки соединительные швы подвергаются рентгеновскому контролю и стабилизирующему отжигу сварных соединений при температуре 850<sup>о</sup>-900<sup>о</sup>С.

С целью улучшения показателей выносливости материала труб и устранения операции шлифования наружной поверхности производят поверхностный наклеп по всей длине трубы методом гидродробеструйной обработки.

### 5.3. Лабораторная работа «Анализ конструкции и технологических процессов изготовления трубопроводов ГТД»

Целью данной работы является проведение анализа конструкции трубопровода ГТД и разработка технологических процессов изготовления элементов трубопровода, подготовка их к сборке и сварке или пайке.

В работе представлены различные варианты конструкции труб (см. рис. 5.3) в соответствии с заданным вариантом приложение 6, и требуемыми значениями положения конца трубы (приложение 7), необходимо произвести анализ фактической области рассеивания конца трубы и произвести корректировку отдельных параметров трубы с целью достижения заданной точности (приложение 7).

В мелкосерийном производстве, при изготовлении трубопроводов используют ручные операции, которые проводятся методом проб и ошибок с применением большого количества пригоночных операций. Пригонка осуществляется с помощью контрольных шаблонов и образцов. Такой способ изготовления связан с большой трудоемкостью. Качество такого метода не высокое.

В серийном производстве для формирования контура трубы трубопровода применяются трубогибочные автоматы и полуавтоматы. Такие станки позволяют в автоматическом или полуавтоматическом режиме формировать основные параметры труб на операции «гибка труб». На рис. 5.1 представлен эскиз элемента трубы и приведены основные геометрические параметры:

1. размер линейного участка -  $a_1$ ;
2. радиус гибки  $R_1$  и угол гибки трубы  $\beta_1$ ;
3. линейный размер -  $a_2$ ;
4. Радиус гибки  $R_2$  и угол гибки трубы  $\beta_2$  и т. п.

Данные параметры позволяют производить гибку трубы в одной плоскости.

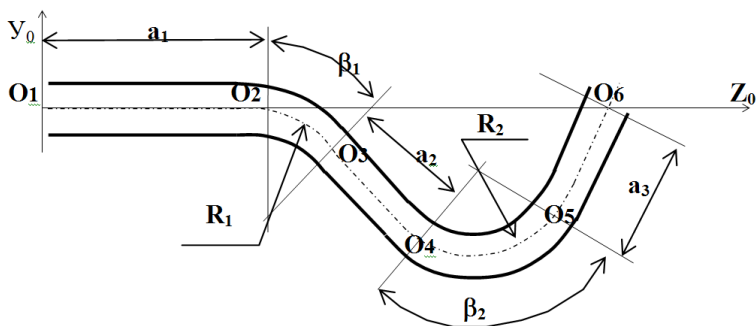


Рис. 5.1. Основные геометрические параметры трубы

Если необходимо произвести гибку трубы в другой плоскости; обеспечивая пространственное расположение элементов трубы, то после гибки одного элемента трубы (колена), производится поворот трубы относительно своей оси на необходимый, заданный угол. После этого процесс гибки трубы продолжается.

Представленные размеры обеспечивают неразрывную связь точек сопряжения ( $O_1, O_2, O_3, \dots, O_i, \dots$  и т.д.) осевой линии трубы на всем ее протяжении. Значения геометрических параметров трубы, представлены в табл. 5.2.

Таблица 5.2

№№	X	Y	Z	[A]	$\varphi$	$\beta$	см.	$\alpha$	$\mu$
1		0	$a_1$			$0^0$			
2		$R_1$	0			$360-\beta^0$			
3		$R_1$	0			$0^0$			
4		0	$a_2$			$0^0$			
5		$R_2$	0			$\beta-90^0$			
6		0	$R_2$			$0^0$			
7		$a_3$	0			$0^0$			

При гибке труб на трубогибочных автоматах или полуавтоматах используется следующая последовательность:

- 1) установка прямолинейной трубы 1 (рис. 5.2а) в шпиндель 2 трубогибочного автомата и фиксация ее положения с помощью цанги 2 в технологической системе станка (координаты XYZ);

- 2) продольная подача трубы 1 в осевом направлении (движение А) на длину  $a_i$  и фиксация этого положения;
- 3) гибка трубы за счет поворота рабочего ролика 3 (рис. 5.2в) относительно опорного ролика 4 (движение В) и возврат рабочего ролика в исходное положение;
- 4) продольная подача трубы 1 в осевом направлении на длину  $a_{(i+1)}$  (движение А) рис. 5.2г и т. д.

Используя эти основные движения в технологической системе трубогибного автомата можно обеспечивать формирование контура трубы в одной плоскости (в нашем примере эта плоскость  $W$ ). Необходимо отметить, что при выполнении пункта 3 у заготовки формируются два геометрических параметра – радиус гибки  $R_i$  и угол гибки.

Для создания контура заготовки трубы в пространстве, кроме вышеперечисленных действий при гибке используется также следующий переход:

Производится поворот шпинделя автомата и соответственно заготовки относительно оси трубы (рис. 5.2д) на угол  $\alpha_i$ .

После выполнения этого перехода операция формирования профиля продолжается в другой плоскости.

Представленный способ гибки труб определяется простановкой размеров в чертеже или операционном эскизе. С целью обеспечения качества трубы в поперечном направлении используются наполнители или различные устройства.

Используя эти основные движения в технологической системе трубогибного автомата можно обеспечивать формирование контура трубы в одной плоскости (в нашем примере эта плоскость  $W$ ).

Необходимо отметить, что при выполнении пункта 3 у заготовки формируются два геометрических параметра – радиус гибки  $R_i$  и угол гибки.

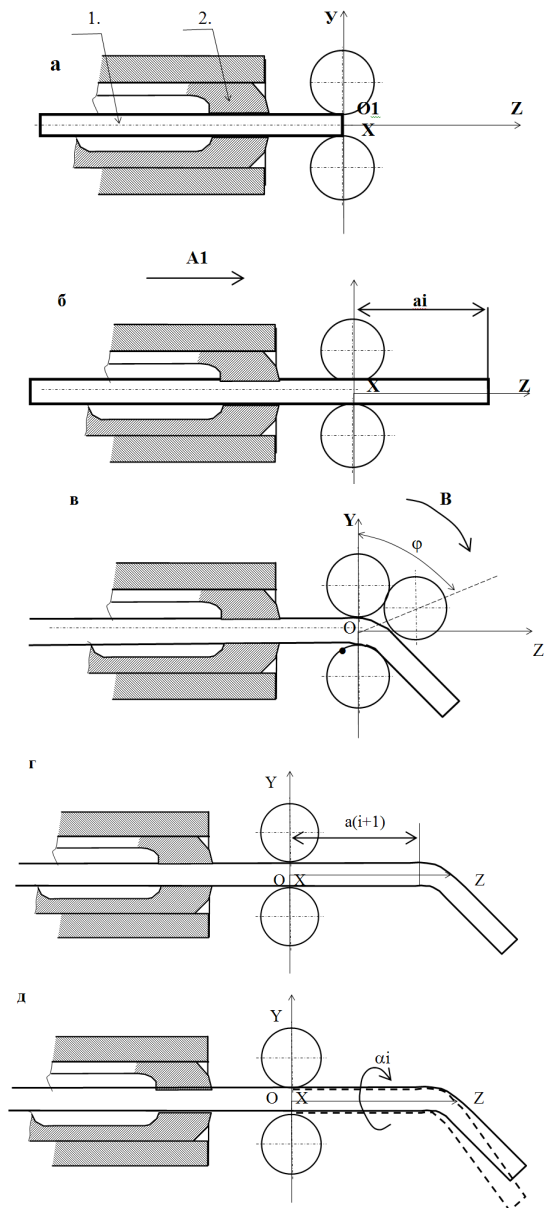


Рис. 5.2. Схема последовательности формирования трубы на трубогибочном полуавтомате

Для создания контура заготовки трубы в пространстве, кроме вышеперечисленных действий при гибке используется также следующий переход:

Производится поворот шпинделя автомата и соответственно заготовки относительно оси трубы (рис. 5.2д) на угол  $\alpha_i$ .

После выполнения этого перехода операция формирования профиля продолжается в другой плоскости.

Представленный способ гибки труб определяется простановкой размеров в чертеже или операционном эскизе. С целью обеспечения качества трубы в поперечном направлении используются наполнители или различные устройства.

Необходимо также, разработать маршрутную технологию процесса изготовления трубы.

Определить параметры плоскостных или пространственных векторных размерных цепей и построить схему размерных связей начала и конца трубопровода в узле.

Заполнить таблицу исходных данных расчетной программы «ВЕКТОР» для ПЭВМ и определить области рассеивания концов суммарного вектора и точек «привязки» ( $A^*$ ,  $A^{**}$ ) трубы к корпусу изделия.

Провести анализ совпадения фактических (расчетных) областей рассеивания суммарных векторов трубопровода и привязки его к корпусу изделия с заданными в таблице 2.

Предложить технологические и конструкторские мероприятия по обеспечению (в случае необходимости) корректировки заданных значений в анализируемом варианте трубопровода.

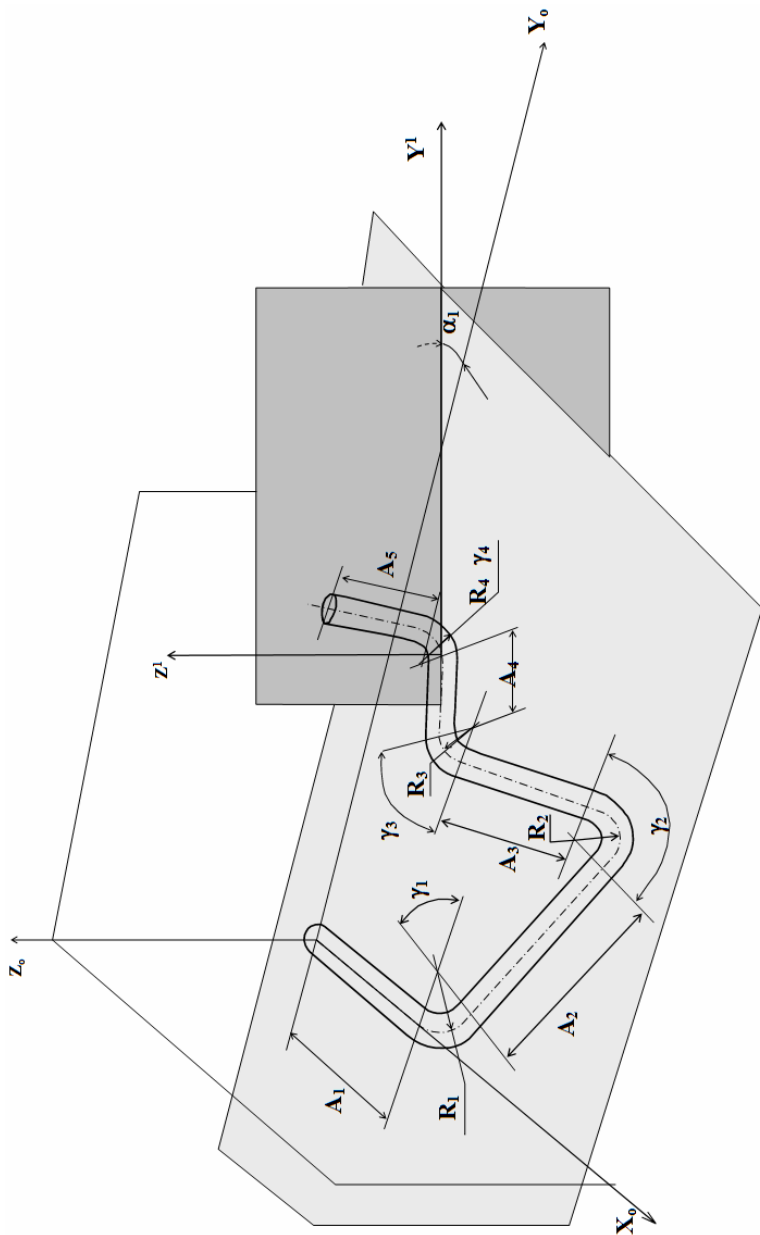


Рис. 5.3. Размерные связи трубы в двух формующих плоскостях



## Приложение 1

Номер квалитета	ДОПУСК		Число единиц Допуска	Методы обработки деталей
	Обознач.	Формула		
5	IT5	7i	7	Притирка и доводка, тонкое (прецизионное) шлифование, суперфиниширование (две операции), полирование тонкое.
6	IT6	10i	10	Притирка и доводка, тонкое (алмазное) обтачивание и растачивание, чистовое протягивание, чистовое шлифование, калибрование отверстий шариком, обкатывание и раскатывание роликами или шариками, хонингование.
7	IT7	16i	16	Чистовое обтачивание и растачивание, чистовое шлифование, чистовое протягивание, развертывание двумя развертками, полирование, холодная штамповка с зачисткой и калибровкой.
8	IT8	25i	25	Чистовое обтачивание и растачивание, развертывание одно – двумя развертками, шлифование, хонингование, обкатывание роликами и шариками, тонкое строгание, тонкое фрезерование, тонкое шабрение.
9	IT9	40i	40	Шлифование, фрезерование, развертывание, обтачивание и растачивание, протягивание.
10	IT10	64i	64	Шлифование, обтачивание и растачивание, зенкерование и развертывание, сверление по кондуктору, чистовое строгание и фрезерование, точное литье под давлением, точное пресование деталей из пластмасс.
11	IT11	100i	100	Чистовое строгание, чистовое фрезерование, сверление по кондуктору, литье по выплавляемым моделям, холодная штамповка, зенкерование, точение и обтачивание.
12	IT12	160i	160	Черновое обтачивание и растачивание, сверление без кондуктора, строгание, долбление, черновое фрезерование, литье в оболочковые формы, холодная штамповка, расквашивание.
13	IT13	250i	250	
14	IT14	400i	400	Черновое обтачивание, растачивание, фрезерование и долбление, литье в песчаные формы и кокиль, литье под давлением, горячая ковка в штампах.
15	IT15	640i	640	
16	IT16	1000i	1000	Грубое обтачивание и растачивание, автоматическая газовая резка, сварка, литье в песчаные формы, горячая ковка в штампах, черновое обтачивание.
17	IT17	1600i	1600	

В приложении 1 представлены расчетные формулы для определения допусков квалитетов, от 5 до 17 и экономически целесообразные методы обработки при обеспечении заданной точности в соответствии с квалитетом. Допуски определяются по общей формуле:

$$IT_q = a_i,$$

где  $q$  – номер квалитета;  $a$  – безразмерный коэффициент, установленный для каждого квалитета и не зависящий от номинального размера (его называют «число единиц допуска»);  $i$  – единица допуска.

$$i = 0,5Dc^{1/3} + 0,001Dc,$$

где  $Dc$  – среднее геометрическое значение интервала размеров принятых в системе допусков.

Пример: Вычислить допуск вала (отверстия) 7-го квалитета для размера 45.

$$Dc = (30 \times 50)^{1/3} = 38,7.$$

Единица допуска  $i = 0,5Dc^{1/3} + 0,001Dc = 0,5 \times 38,7^{1/3} + 0,001 \times 38,7 = 1,56$ , тогда

$$IT7 = a_7 = 16 \times 1,56 = 24,9 = 25 \text{ мкм.}$$

## Приложение 2

### ДОПУСКИ Т (МКМ) ПАРАЛЛЕЛЬНОСТЬ, ПЕРПЕНДИКУЛЯРНОСТИ, НАКЛОНА, ТОРЦЕВОГО И ПОЛНОГО БИЕНИЯ

СТЕПЕНЬ ТОЧНОСТИ	НОРМАЛЬНАЯ ДЛИНА НОРМИРУЕМОГО УЧАСТКА, ММ. НОМИНАЛЬНЫЙ ДИАМЕТР ТОРЦЕВОЙ ПОВЕРХНОСТИ, ММ.								
	ДО 10	ДО 16	ДО 25	ДО 40	ДО 63	ДО 100	ДО 160	ДО 250	ДО 400
1	0,4	0,5	0,6	0,8	1,0	1,2	1,6	2,0	2,5
2	0,6	0,8	1,0	1,2	1,6	2,0	2,5	3,0	4,0
3	1,0	1,2	1,6	2,0	2,5	3,0	4,0	5,0	6,0
4	1,6	2,0	2,5	3,0	4,0	5,0	6,0	8,0	10,0
5	2,5	3,0	4,0	5,0	6,0	8,0	10,0	12,0	16,0
6	4,0	5,0	6,0	8,0	10,0	12,0	16,0	20,0	25,0
7	6,0	8,0	10,0	12,0	16,0	20,0	25,0	30,0	40,0
8	10,0	12,0	16,0	20,0	25,0	30,0	40,0	50,0	60,0
9	16,0	20,0	25,0	30,0	40,0	50,0	60,0	80,0	100,0
10	25,0	30,0	40,0	50,0	60,0	80,0	100,0	120,0	160,0
11	40,0	50,0	60,0	80,0	100,0	120,0	160,0	200,0	250,0
12	60,0	80,0	100,0	120,0	160,0	200,0	250,0	300,0	400,0
13	100,0	120,0	160,0	200,0	250,0	300,0	400,0	500,0	600,0
14	160,0	200,0	250,0	300,0	400,0	500,0	600,0	800,0	1000,0
15	250,0	300,0	400,0	500,0	600,0	800,0	1000,0	1200,0	1600,0
16	400,0	500,0	600,0	800,0	1000,0	1200,0	1600,0	2000,0	2500,0

## Приложение 3

### ДОПУСКИ Т (МКМ) РАДИАЛЬНОГО БИЕНИЯ И ПОЛНОГО РАДИАЛЬНОГО БИЕНИЯ. ДОПУСКИ Т (МКМ) СООСНОСТИ, СИММЕТРИЧНОСТИ, ПЕРЕСЕЧЕНИЯ ОСЕЙ В ДИАМЕТРАЛЬНО ВЫРАЖЕНИИ

Степень точности	Номинальный размер (диаметр) рассматриваемой поверхности.								
	До 3	До10	До18	До 30	До 50	До 120	До 250	До 400	До 630
1	0,8	1,0	1,2	1,6	2,0	2,5	3,0	4,0	5,0
2	1,2	1,6	2,0	2,5	3,0	4,0	5,0	6,0	8,0
3	2,0	2,5	3,0	4,0	5,0	6,0	8,0	10,0	12,0
4	3,0	4,0	5,0	6,0	8,0	10,0	12,0	16,0	20,0
5	5,0	6,0	8,0	10,0	12,0	16,0	20,0	25,0	30,0
6	8,0	10,0	12,0	16,0	20,0	25,0	30,0	40,0	50,0
7	12,0	16,0	20,0	25,0	30,0	40,0	50,0	60,0	80,0
8	20,0	25,0	30,0	40,0	50,0	60,0	80,0	100,0	120,0
9	30,0	40,0	50,0	60,0	80,0	100,0	120,0	160,0	200,0
10	50,0	60,0	80,0	100,0	120,0	160,0	200,0	250,0	300,0
11	80,0	100,0	120,0	160,0	200,0	250,0	300,0	400,0	500,0
12	120,0	160,0	200,0	250,0	300,0	400,0	500,0	600,0	800,0
13	200,0	250,0	300,0	400,0	500,0	600,0	800,0	1000,0	1200,0
14	300,0	400,0	500,0	600,0	800,0	1000,0	1200,0	1600,0	2000,0
15	500,0	600,0	800,0	1000,0	1200,0	1600,0	2000,0	2500,0	3000,0
16	800,0	1000,0	1200,0	1600,0	2000,0	2500,0	3000,0	4000,0	5000,0

Приложение 4

По Бриннелю		По Роквеллу HRC	Предел прочности стали $\sigma_b$ (МПа)			
d (в мм.)	HB (МПа)		Угледстая	Хромистая	Хромо- никелевая	Хромомо- либденовая
2,34	6880	65	2480	-	2340	2270
2,37	6700	64	2410	-	2280	2210
2,39	6590	63	2370	-	2240	2180
2,42	6430	62	2310	-	2180	2120
2,45	6270	61	2260	2180	2130	2070
2,48	6110	60	2200	2130	2070	2020
2,51	5970	59	2140	2080	2020	1970
2,54	5820	58	2080	2030	1970	1920
2,57	5690	57	2050	2000	1940	1880
2,62	5470	55	1960	1910	1850	1800
2,71	5100	52	1830	1780	1730	1680
2,78	4850	50	1750	1700	1650	1600
2,85	4610	48	1650	1620	1560	1520
2,91	4410	46	1590	1540	1500	1450
2,98	4200	44	1510	1470	1430	1380
3,08	3930	42	1410	1370	1340	1300
3,14	3780	40	1360	1320	1280	1250
3,24	3540	38	1280	1240	1210	1170
3,34	3330	36	1200	1170	1130	1100
3,44	3130	34	1120	1090	1060	1030
3,52	2980	32	1070	1040	1020	980
3,62	2820	30	1020	980	960	930
3,70	2690	28	980	940	920	890
3,80	2550	26	920	890	860	840
3,90	2410	24	870	840	820	800
4,00	2290	22	820	800	780	760
4,10	2170	20	780	760	740	720
4,20	2070	18	740	720	700	680
4,26	2000	-	720	700	680	660
4,37	1900	-	680	670	650	630
4,48	1800	-	650	630	610	590
4,60	1700	-	610	590	580	560
4,74	1600	-	580	560	540	520
4,88	1500	-	540	520	510	500
5,05	1400	-	500	490	480	470
5,21	1300	-	470	450	440	430
5,42	1200	-	430	420	410	400
5,63	1100	-	400	390	380	370
583	1020	-	370	360	350	340

ПАРАМЕТРЫ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ЖАРОПРОЧНЫХ И ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ ПОСЛЕ РАЗЛИЧНЫХ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ

Метод обработки	Шероховатость Ra, мкм.	Деформационное упрочнение		Микронапряжения (максимальные значения), МПа	
		Глубина, мкм.	Степень, %	Касательные $\pm \sigma_x$	Осевые $\pm \sigma_z$
<b>Точение:</b> Чистовое Окончательно	3,0...5,0	100...150	35...50	200...600	-400...200
	1,0...2,5	80...100	30...40	250...400	-500...100
<b>Фрезерование:</b> Встречно-чистовое Попульное-чистовое	3,0...5,0	50...150	40...60	-	350...500
	3,0...5,0	30...80	25...50	-	250...400
<b>Шлифование:</b> Круговое вращением чистовое Круговое вращением окончательное Круговое с продольной подачей: Чистовое Окончательно Плоское черновое (после ЭХО) Плоское чистовое Плоское окончательное Плоское тонкое	0,8...1,5	60...100	40...50	500...700	100...300
	0,5...1,0	40...70	40...50	300...400	-100...200
	0,8...2,0	70...90	35...40	500...700	200...300
	0,6...0,4	40...50	35...40	400...500	200...300
	3,0...5,0	50...65	40...50	-	400...550
	0,8...1,25	50...60	35...40	-	400...500
<b>Полирование:</b> Фетровым кругом с наклепанным абразивным зерном (после точения, шлифования) Виброконтактное (после ЭХО) Виброконтактное после полирования фетровым кругом и ЭХО Виброконтактное (после полирования фетровым кругом, шлифования лентой и ЭХО) Электрополирование (после ЭХО) $q = 30 \text{ А/см}^2$	0,3...0,15	30...50	30...40	400...500	-200...400
	0,3...0,15	10...20	5...10	-	-100...300
	0,2...0,3	10...15	5...10	-	-250...300
	0,2...0,3	20...35	8...15	-	-250...350
	0,3...0,15	-	-	-	-
	<b>Электрохимическая обработка:</b> $q = 10...15 \text{ А/см}^2$ $q = 20...25 \text{ А/см}^2$ $q = 30...35 \text{ А/см}^2$	0,6...0,25	-	-	-
0,5...0,2		-	-	-	-
0,3...0,2		-	-	-	-
<b>Электроэрозионная обработка с последующей термообработкой</b>	10...6	50...70	10...20	-	-200...300
<b>Гидрогалтовка (после ЭХО)</b>	0,4...0,65	20...80	20...60	-	-400...500
<b>Виброгалтовка (после ЭХО)</b>	0,07...0,2	50...100	15...255	-	-300...500
<b>Деформационное упрочнение шариками.</b>	0,2...0,6	50...80	10...400	-	-700...1000

## Приложение 6

ПАРАМ. № ВАР.	A1	R1	$\gamma_1$	A2	R2	$\gamma_2$	A3	R3	$\gamma_3$	A4	A*	A**	Примечание.
1	100	80	45°	300	80	60°	400	80	45°	200	150	-	Допуски на линейные размеры: при A1
2	100	80	45°	300	80	60°	400	-	-	-	200	-	от 100 до 300 мм. вкл. П $\pm$ $\pm$ 0,5 мм.
3	200	80	45°	300	80	60°	400	80	45°	200	-	200	от 300 до 500 мм. вкл. П $\pm$ $\pm$ 0,6 мм.
4	200	80	45°	300	80	60°	400	-	-	-	-	-	Допуски
5	100	80	60°	300	80	45°	400	80	60°	200	150	-	на радиусы: П $\pm$ $\pm$ 0,5 мм.
6	100	80	60°	300	80	45°	400	-	-	-	200	-	Допуски
7	200	80	60°	300	80	45°	400	80	60°	100	-	200	на угловые параметры: П $\gamma/\beta$ $\pm$ 0,5°.
8	200	80	60°	300	80	45°	400	-	-	-	-	200	
9	100	80	45°	300	80	45°	400	80	45°	200	-	200	
10	100	80	45°	300	80	45°	400	-	-	-	150	-	
11	200	80	45°	300	80	45°	400	80	45°	100	150	-	
12	200	80	45°	300	80	45°	400	-	-	-	-	200	
13	200	80	60°	300	80	60°	400	-	-	-	-	200	
14	200	80	60°	300	80	60°	200	-	-	-	-	100	

## Приложение 7

№ ВАР. ПАРАМ	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Xo	920 $\pm$ 2	700 $\pm$ 2	920 $\pm$ 2	700 $\pm$ 2	940 $\pm$ 2	735 $\pm$ 2	940 $\pm$ 2	735 $\pm$ 2	875 $\pm$ 2	690 $\pm$ 2	800 $\pm$ 2	690 $\pm$ 2	670 $\pm$ 2	490 $\pm$ 2
Yo	400 $\pm$ 2	300 $\pm$ 2	500 $\pm$ 2	300 $\pm$ 2	400 $\pm$ 2	225 $\pm$ 2	500 $\pm$ 2	335 $\pm$ 2	580 $\pm$ 2	405 $\pm$ 2	510 $\pm$ 2	505 $\pm$ 2	130 $\pm$ 2	230 $\pm$ 2
XAi*	125 $\pm$ 3	165 $\pm$ 3	505 $\pm$ 3	505 $\pm$ 3	170 $\pm$ 3	205 $\pm$ 3	540 $\pm$ 3	540 $\pm$ 3	490 $\pm$ 3	125 $\pm$ 3	125 $\pm$ 3	490 $\pm$ 3	490 $\pm$ 3	450 $\pm$ 3
YAi*	260 $\pm$ 3	300 $\pm$ 3	440 $\pm$ 3	440 $\pm$ 3	245 $\pm$ 3	270 $\pm$ 3	375 $\pm$ 3	375 $\pm$ 3	400 $\pm$ 3	260 $\pm$ 3	260 $\pm$ 3	500 $\pm$ 3	250 $\pm$ 3	275 $\pm$ 3

Учебное издание

Составитель: *Демин Феликс Ильич*

**ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТОЧНОСТИ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРИ  
ИЗГОТОВЛЕНИИ ДЕТАЛЕЙ ГТД**

Учебное пособие

Редакторская обработка  
Компьютерная верстка  
Доверстка

Подписано в печать \_\_\_\_\_ г. Формат 60x84 1/16.

Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. \_\_\_\_\_. Усл. кр.-отт. \_\_\_\_\_. Печ.л. 5,0.

Тираж \_\_\_\_\_ экз. Заказ \_\_\_\_\_ . ИП-33/2007

Самарский государственный  
аэрокосмический университет.  
443086 Самара, Московское шоссе, 34.

---

Изд-во Самарского государственного  
аэрокосмического университета.  
443086 Самара, Московское шоссе, 34.