

**СКИФ**



ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
УПРАВЛЕНИЕ ДИСТАНЦИОННОГО ОБУЧЕНИЯ И ПОВЫШЕНИЯ  
КВАЛИФИКАЦИИ

Кафедра «Технология машиностроения»

## **Учебное пособие** по дисциплине

# **«Основы технологии машиностроения»**



Автор  
Давыдова И. В.

Ростов-на-Дону, 2018

## Аннотация

Учебное пособие «Основы технологии машиностроения» предназначено для бакалавров дневной и заочной форм обучения направлений 15.03.02 «Технологические машины и аппараты пищевых производств» и 15.03.03 «Прикладная механика».

## Автор

к.т.н, доцент кафедры «Технология машиностроения»  
Давыдова И.В.



## Оглавление

1. Общие положения технологии машиностроения как науки.....	4
1.1. ТМ как научная и учебная дисциплина.....	4
1.2. Сущность основных понятий и положений.....	10
2. Основы достижения качества изготовления машин и деталей.....	24
2.1. Машина как объект производства.....	24
2.2. Точность изделия.....	30
2.3. Базирование сборочных единиц и деталей.....	44
3. Метрологические основы дисциплины «ОТМ».....	54
3.1. Отклонения показателей точности изделия.....	54
3.2. Размерные связи в машине.....	63
3.3. Методы достижения точности замыкающего звена.....	83
3.4. Достижение точности изготовления деталей.....	112
4. Качество поверхности деталей машин.....	137
4.1. Понятие и общие сведения о качестве поверхности.....	137
4.2. Характеристика важнейших эксплуатационных свойств деталей.....	142
5. Припуски на обработку деталей.....	159
5.1. Понятие припуска.....	159
5.2. Методы определения величины припуска.....	163
6. Повышение производительности труда изготовления машины и деталей пищевого производства.....	184
6.1. Техничко-экономические показатели изготовления изделий в машиностроении.....	184
6.2. Конструкторские пути повышения производительности труда – улучшение технологичности конструкции машин и деталей.....	189
Список литературы.....	196

## **1. Общие положения технологии машиностроения как науки**

### **1.1. ТМ как научная и учебная дисциплина**

Машиностроение – это та отрасль промышленности, которая обеспечивает средствами труда все остальные отрасли реальной экономики, а так же всех членов общества бытовой техникой, машинами и устройствами индивидуального пользования, повышающих комфортность быта и общественной жизни.

Отрасль прикладной науки, занимающаяся изучением закономерностей явлений, действующих в процессе изготовления машин, с целью использования этих закономерностей для обеспечения требуемого качества машин и наименьших затрат на их производство, называется технологией машиностроения.

Таким образом объектом изучения технологии машиностроения является процесс изготовления машины, а предметной областью – те явления и их закономерности, которые оказывают влияние на качество производимых машин и на затраты на их производство.

Как и всякая прикладная наука, технология машиностроения выросла из практики. Наибольшее развитие процессов изготовления машиностроительной продукции в прошлом получило в оружейных мастерских и заводах. В 1587 году русский мастер Андрей Чохов отлил знаменитую Царь-пушку, которая хотя и не стреляла ни разу, свидетельствует нам сегодня об уровне технологии литейного дела в XVI веке. В 1632 году около Тулы были построены заводы для изготовления литых пушек, стволы кото-

рых высверливались и растачивались. В 1615 году в России была изготовлена первая пушка с нарезным стволом. При Петре I в созданной им академии работал великий русский мастер и умелец А.К. Нартов, который разработал ряд технологических процессов изготовления артиллерийского и стрелкового оружия и создал для их осуществления оригинальные станки и инструменты. А.К. Нартов создал первый в мире токарный станок с механическим приводом суппорта, что можно считать первым шагом на пути автоматизации технологических систем. В XVIII веке (1761 год) на Тульском оружейном заводе впервые в мире было разработано и внедрено измерение изготовленных деталей жесткими калибрами, что существенно повысило производительность производства при обеспечении требуемого качества.

Аналогичные примеры можно привести и из истории таких промышленно развитых стран как Англия, Франция, Германия и др. Отечественная и мировая история развития техники и технологии – это предметная область увлекательной части исторической науки.

Накопленные знания и опыт мастера передавали из поколения в поколение своим ученикам в ходе совместной работы. Обучение всегда было практическим. Использование накопленного опыта ограничивалось кругом учеников, в лучшем случае он распространялся в пределах одного предприятия. С началом промышленной революции в XIX веке началось изучение и обобщение такого опыта в масштабе всего машиностроения. В России первая книга, в которой описывался накопленный опыт промышленности, была издана в 1807 году. Называлась она «Начальные основы технологии или краткое описание работ, на заводах и

фабриках производимых», ее автор – профессор Московского университета И.В. Двигубский. В 1885 году профессор И.И. Тиме выпустил капитальный труд в трех томах «Основы машиностроения, организация машиностроительных фабрик в технологическом и экономическом отношении и производство работ». Профессор А.П. Гавриленко выпустил в начале XX века учебник «Технология металлов», по которому учились несколько поколений русских инженеров. В XIX и начале XX века под технологией машиностроения понималась техника производства машин. Предметная область технологии машиностроения включала оборудование, инструмент, приспособления, процессы производства заготовок, процессы обработки деталей и сборки машин, транспортировки и испытаний, проектирование участков, цехов и заводов, организацию и управление, экономику. Другими словами, технология машиностроения охватывала весь производственный процесс.

Создание и развитие крупных машиностроительных производств в мире и в СССР в ходе индустриализации страны сопровождалось горизонтальным и вертикальным разделением труда. Горизонтальное разделение труда привело к выделению из технологии машиностроения в отдельные области знания и соответствующие инженерные специальности технологий заготовительных производств: технология и оборудование производства отливок, технология и оборудование обработки металлов давлением, технология и оборудование термической обработки, технология и оборудование сварочного производства и т. д. В ходе вертикального разделения труда из технологии машиностроения выделились в отдельные специальности и области научного знания: организация и управление предприятием, экономика пред-

приятия и др. В последней четверти XX века из технологии машиностроения выделились в отдельные специальности «Металлорежущие станки», «Инструментальные системы машиностроительных производств». Предметная область технологии машиностроения как науки, так и специальности (практики) сузилась и охватывает сегодня процессы производства деталей из заготовок и сборки из них машин, т.е. процессы механосборочного производства.

Строительство в СССР в 30-е годы прошлого века крупных машиностроительных заводов потребовало обеспечения их инженерными кадрами. Для их подготовки в начале 30-х годов в стране был создан ряд инженерных вузов, где была организована массовая подготовка инженеров-технологов для различных переделов машиностроительного производства. В эти годы вышел ряд учебников по технологии машиностроения, в которых описывался и обобщался опыт отдельных отраслей: «Технология автотракторостроения» проф. В.М Кована, «Технология станкостроения» Б.С. Балакшина, и др.

В 1938 г. Проф. А.П. Соколовский выпустил учебник под названием «Основы технологии машиностроения» содержащий, в основном, описание технологии обработки типовых деталей. Примерно таким же был учебник проф. В.М. Кована «Технология машиностроения», вышедший в 1944 г. Технология машиностроения как учебная дисциплина представлялась сборником лучших рецептов изготовления различных деталей, и лучшим технологом мог стать тот, кто хорошо ориентировался в этом, выражаясь современным языком, банке данных.

Но параллельно с этим шел процесс научного осмыс-

ления процессов и явлений, протекающих в технологических системах и во всем технологическом процессе. Уже в указанных учебниках фрагментарно содержались результаты этих научных поисков, более подробно и обширно научные основы технологии машиностроения дискутировались в научных изданиях и научной периодике. Проф. А.П. Соколовский и его ученики разрабатывали учение о жесткости станков и ее влиянии на точность обработки деталей, проф. Б.С. Балакшин разрабатывал основы теорий базирования и размерных цепей, в трудах Н.А. Бородачева, В.М. Кована, Б.С. Балакшина, А.Б. Яхина и др. формируется теория точности обработки на основе изучения первичных погрешностей и методов их суммирования в получаемом размере, в трудах И.В. Дунина-Барковского, Ю.В. Линника, П.Е. Дьяченко, А.И. Исаева, Б.И. Костецкого, И.В. Крагельского, И.В. Кудрявцева, А.А. Маталина и др. формируется учение о качестве поверхности детали и его влиянии на эксплуатационные свойства машины, в трудах Д.В. Чарнко, Ф.С. Демьянюка, В.В. Бойцова, С.П. Митрофанова и др. разрабатываются основы построения технологических операций и процессов в массовом поточном и серийном производствах, закладываются основы построения гибких технологий.

Развитие технологии машиностроения как науки привело к тому, что общая учебная дисциплина «Технология машиностроения» разделилась на две:

1. «Основы технологии машиностроения», в которой рассматриваются:

а) задача достижения требуемого качества машины и средства ее решение: теория базирования и ее приложения, теория размерных цепей и размерный анализ технологических про-

цессов и операций, учение о качестве поверхности, управление точностью обработки деталей;

б) задача достижения минимума затрат на производство машины и средства ее решения: понятие и структура технологической себестоимости, технологические возможности снижения затрат на материалы (методы расчета припусков и размеров заготовок), затраты времени на рабочем месте и пути их снижения как средства повышения производительности труда и сокращения затрат живого труда на производство машины, экономическое обоснование выбора варианта технологической операции и процесса в целом;

в) принципиальные основы разработки технологических процессов.

2. «Технология машиностроения», которая представляет собой рецептурную часть технологии машиностроения и в которой изучаются методы обработки и их технологические возможности, правила разработки технологических процессов, технологические процессы изготовления типовых деталей и сборки узлов, технологическая подготовка производства, правила единой системы технологической документации (ЕСТД).

Предлагаемое учебное пособие относится к первой учебной дисциплине «Основы технологии машиностроения» и в нем рассматриваются все вопросы, связанные с решением первой задачи – достижением требуемого качества машины. Дается трактовка понятия «качество машины», рассматривается информационная модель всего процесса создания машины от замысла до передачи потребителю, в которой прослеживается решение проблемы достижения качества машины на всех этапах процесса,

рассматриваются задачи всех участников процесса создания машины по обеспечению требуемого качества, особенно подробно рассмотрены задачи технологов механосборочного производства по достижению требуемого качества машины и методы и средства их решения.

## **1.2. Сущность основных понятий и положений**

Исходным, побудительным мотивом любого производства является удовлетворение потребности человека или человеческого общества. Эти потребности многообразны и практически безграничны, однако ресурсы для их удовлетворения ограничены. Потребности удовлетворяются товарами, причем одна и та же потребность может удовлетворяться различными товарами, например, кому-то для поездки на работу необходим автомобиль, а кому-то вполне достаточно будет и велосипеда. Важным свойством товара является объем ресурсов, используемых в его производстве. Этот объем ресурсов непосредственно влияет на цену данного товара. Поэтому решение о том, выходить ли на рынок с новым товаром требует тщательного предварительного обоснования и проработки. Необходимо правильно оценить все этапы жизненного цикла планируемого к выпуску товара, который включает:

- проектирование;
- производство;
- распределение между потребителями;

- потребление товара;
- утилизацию отходов.

Производство с преимущественным применением методов технологии машиностроения при выпуске изделий называется **машиностроительным**. Структурной основой машиностроительного завода является цех, представляющий собой совокупность производственных участков. Производственный участок объединяет группу рабочих мест.

**Рабочее место** — элементарная единица структуры предприятия, где размещаются исполнители работы, обслуживаемое ими технологическое оборудование, средства труда (оснастка) и предметы труда

Для превращения предметов труда в полезное для человека изделие служит производственный процесс. Производственный процесс включает все этапы, которые проходит предмет труда на пути превращения в изделие. Так, например, железная руда сначала добывается в шахтах, затем транспортируется на металлургические заводы, где после плавки превращается в металл. Металл поступает на машиностроительный завод и после различного рода обработки (со снятием и без снятия стружки) превращается в детали. Из деталей при помощи сборки и последующей отделки получается готовое изделие.

Любое производство предназначено для реализации производственного процесса изготовления готовой продукции.

**Производственный процесс** — это совокупность всех действий людей и орудий труда, необходимых на данном предприятии для изготовления и ремонта продукции.

К основным этапам производственного процесса относят:

- получение и складирование заготовок;
- доставка заготовок к рабочим местам;
- различные виды обработки;
- перемещение полуфабрикатов между рабочими местами;
- контроль качества деталей;
- хранение на складах;
- сборка изделия;
- контроль качества изделия;
- испытания изделия;
- регулировка изделия;
- окраска изделия;
- упаковка изделия и отправка его на склад или к потребителю.

Изготовление изделий на машиностроительных предприятиях осуществляется в результате производственного процесса.

**Производственный процесс** (ПП) – это совокупность всех действий людей и орудий труда, необходимых на данном предприятии для изготовления и ремонта продукции. Производственный процесс в машиностроении охватывает подготовку средств производства и организацию обслуживания рабочих мест; получение и хранение материалов и полуфабрикатов; все стадии изготовления деталей машин; сборку изделий; транспортирование материалов, заготовок, деталей, готовых изделий и их элементов; технический контроль на всех стадиях производства; упаковку готовой продукции и другие действия, связанные с изготовлением выпускаемых изделий.

**Технологическим процессом** (ТП) называют часть производственного процесса, содержащую целенаправленные действия по изменению и (или) определению состояния предмета труда, к которым относятся заготовки и изделия.

По последовательности выполнения различают ТП изготовления исходных заготовок, термической и механической обработки заготовок, сборки изделий. В ТП изготовления заготовок происходит превращение материала в исходные заготовки заданных размеров и конфигурации путем литья, обработки давлением, резки проката и т.д. В процессе термической обработки происходят структурные превращения материала заготовок, изменяющие его свойства. При механической обработке наблюдается последовательное изменение состояния исходной заготовки до получения готовой детали. ТП сборки связан с образованием разъемных и неразъемных соединений составных частей изделия.

**Технологическим оборудованием** называют средства технологического оснащения (СТО), в которых для выполнения определенной части ТП размещаются материалы или заготовки, а также средства воздействия на них: литейные машины, прессы, металлорежущие станки, печи, гальванические ванны, испытательные стенды и т.д.

Средства технологического оснащения, дополняющие технологическое оборудование для выполнения определенной части ТП, называют **технологической оснасткой** (режущий инструмент, штампы, приспособления, испытательные стенды и т.д.)

Технологический процесс выполняют на рабочих местах.

**Рабочим местом** называют элементарную единицу структуры предприятия, где размещены исполнители работы, обслуживаемое технологическое оборудование, часть конвейера, а на ограниченное время – оснастка и предметы труда. Рабочее место – участок производственной площади, оборудованный в соответствии с выполняемой на нем работой.

**Технологической операцией** (ТО) называют законченную часть ТП, выполняемую на одном рабочем месте. Применительно к условиям механосборочного производства технологической операцией называется часть ТП, выполняемая непрерывно на одном рабочем месте, над одним или несколькими одновременно обрабатываемыми или собираемыми изделиями, одним или несколькими рабочими.

**Технологический переход** – законченная часть ТО, характеризующаяся постоянством применяемого инструмента и поверхностей, образуемых обработкой или соединяемых при сборке, выполняемая одними и теми же СТО при постоянных технологических режимах.

**Технологическим режимом** называют совокупность изменений параметров ТП в определенном интервале времени. К технологическим режимам относят: глубину резания, подачу, скорость резания, температуру нагрева или охлаждения ( $t, s, v, t^\circ$ ).

**Вспомогательный переход** – это законченная часть ТО, состоящая из действий человека и (или) оборудования, которые не сопровождаются изменением свойств предметов труда, но необходимые для выполнения ТП.

**Установ** – это часть ТО, выполняемая при неизменном

закреплении обрабатываемой заготовки или СЕ.

**Позиция** - фиксированное положение, занимаемое неизменно закрепленной обрабатываемой заготовкой или собираемой СЕ совместно с приспособлением относительно инструмента или неподвижных частей оборудования.

**Приём** – законченная совокупность действий человека при выполнении сборочного перехода или его части, объединенных одним целевым назначением.

**Рабочий ход** – законченная часть технологического перехода, состоящая из однократного перемещения инструмента относительно заготовки, сопровождаемого изменениями формы, размеров, качества поверхности или свойств заготовки.

**Машиной** называют устройство, выполняющее механические движения для преобразования энергии, материалов и информации с целью замены или облегчения физического и умственного труда человека. Машины разделяют на *энергетические* (электродвигатели, двигатели внутреннего сгорания, турбины и т.д.), *рабочие* (транспортные и технологические машины: автомобили, самолеты, тракторы, транспортеры, прокатные станы и т.д.) и *информационные* (измерительные, контрольно-управляющие и т.д.).

Производство машины предполагает ее проектирование и конструирование, технологическую подготовку производства, непосредственно промышленное производство, отгрузку и транспортирование потребителю.

**Изделием** в машиностроении называются любой предмет производства, подлежащий изготовлению на предприятии. Изде-

лием может быть машина, ее элементы в сборе или отдельная деталь в зависимости от того, что является продуктом конечной стадии данного производства.

Изделия могут быть неспецифицированными (не имеющими составных частей) и специфицированными (состоящими из двух или более частей).

**Деталь** – это изделие, изготавливаемое из однородного по наименованию и марке материала без применения сборочных операций. Характерный признак детали - отсутствие в ней разъемных и неразъемных соединений (например, вал, зубчатое колесо).

**Сборочная единица (СЕ)** - это изделие, составные части которого подлежат соединению на предприятии-изготовителе сборочными операциями (свинчиванием, склеиванием, клепкой, опрессовкой и т.п.). Характерной особенностью СЕ является возможность ее сборки обособленно от других элементов изделия (например, коробка скоростей, редуктор, составной коленчатый вал и т.п.).

**Сборочный комплект** – это группа составных частей изделия, которые необходимо подать на рабочее место для сборки изделия или его составной части.

**Комплекс** – это два и более специфицированных (состоящих из двух и более составных частей) изделия, не соединенных на предприятии-изготовителе сборочными операциями, но предназначенных для выполнения взаимосвязанных эксплуатационных функций (например, автоматическая линия, цех-автомат, станок с ЧПУ с управляющими панелями, компьютер-монитор-системный блок-клавиатура-принтер и т.п.).

**Комплект** – это два и более изделия, не соединенных на предприятии-изготовителе сборочными операциями и представляющих набор изделий, которые имеют общее эксплуатационное назначение вспомогательного характера (например, комплекты запасных частей, инструмента и принадлежностей, измерительной аппаратуры, упаковочной тары и т.п.).

Производство машины можно рассматривать как процесс, основными этапа которого являются: 1) приобретение и изготовление исходных материалов, полуфабрикатов и заготовок (отливок, проката и поковок); 2) изготовление деталей; 3) сборка машины. На каждом этапе производства машины применяют соответствующие *технологические методы*, под которыми понимают совокупность правил, определяющих последовательность и содержание действий при выполнении формообразования, обработки или сборки, перемещения, включая технологический контроль и испытания.

В машиностроении различают три типа производства: массовое, серийное, единичное (ГОСТ 14.004-83).

*Единичное производство* характеризуется не повторяемостью номенклатуры выпускаемых изделий. Технологические процессы (методы обработки, сборки, контроля) универсальны, то есть применимы для широкой номенклатуры изготавливаемых изделий. Средства технологического оснащения (оборудование, приспособления, инструмент) так же универсальны. Производственные рабочие, обслуживающие единый тип производства, высокой квалификации. Технологическая подготовка производства не детализируется (технологические процессы – маршрут-

ные, а не операционные, то есть включают только название операций, модель оборудования и норму штучного времени).

*Серийное производство* характеризуется периодической повторяемостью номенклатуры выпускаемых изделий. Детали изготавливаются партиями или сериями. Технологические процессы характеризуются более высокой специализацией для определяемых групп деталей. Технологическое оборудование применяется как универсальное, но оснащенное специальными приспособлениями, так и специальное оборудование. Основное требование к оборудованию - возможность быстрой переналадки, например, станок с числовым программным управлением. Рабочие менее высокой квалификации, по сравнению с единичным производством. Технология подготовки более трудоемка: применяются как маршрутные карты, так и операционные технологические процессы (операции технологического процесса, в отличие от маршрутного, включают не только перечисление, но и устанавливают переходы (последовательность) изготовления, режимы обработки, инструмент и т.д.).

*Массовое производство* характеризуется постоянной номенклатурой выпускаемых изделий (узкая номенклатура при большой годовой программе выпуска). За каждым рабочим местом в массовом производстве закрепляется одна, максимум две операции. Технологические процессы и средства технологического оснащения узкоспециальные. Применяется специальное оборудование, приспособления и инструмент, предназначенные для изготовления только одной номенклатуры изделий. Рабочие более низкой квалификации, чем в серийном производстве. Технологическая подготовка производства наиболее трудоемкая. Тру-

доемкость изготовления изделия минимальна.

### *Определение типа производства*

Для каждого производства устанавливают определенную программу выпуска изделий. **Программа выпуска изделий** – это совокупность изделий установленной номенклатуры, выпускаемых в заданном объеме в год.

**Объем выпуска** – количество изделий определенных наименований, типоразмера и исполнения, изготовленных или ремонтируемых объединением, предприятием или его подразделением в течение планируемого интервала времени.

Характеристики машиностроительного предприятия во многом зависят от типа производства. Для определения типа производства используется коэффициент закрепления операций.

Отношение числа всех различных технологических операций  $O$ , выполненных или подлежащих выполнению в течение планового периода, равного одному месяцу, к числу рабочих мест  $P$  называется коэффициентом закрепления операций  $K_{з.о.}$

$$K_{з.о.} = O/P. \quad (1)$$

Коэффициент закрепления операций при определении типа производства часто заменяют на коэффициент серийности  $K_C$ , который определяется по зависимости:

$$K_C = \frac{\tau}{t_{ум}} \quad , \quad (2)$$

где  $\tau$  - **такт выпуска** изделий (промежуток времени, через которые периодически выпускается изделие определенного

наименования, типоразмера и исполнения).

$t_{шт}$  - среднее штучное время изготовления изделия.

Такт выпуска (мин/шт.) определяется по формуле:

$$\tau = \frac{F_o \cdot 60}{N_D} \quad , \quad (3)$$

где  $F_o$  — действительный фонд времени в планируемом периоде (месяц, сутки, смена), ч;  $N_D$  — производственная программа на этот же период, шт.

Действительный фонд времени работы универсального оборудования при односменной работе равен 2040 ч, при двухсменной — 4060 ч. (для механической обработки).

Ритм – величина – обратная такту выпуска. **Ритм** – это количество изделий определенного наименования, типоразмера и исполнения, выпускаемых в единицу времени.

В случае отсутствия данных на предварительных стадиях проектирования ориентировочно в машиностроении тип производства можно определить на основе программы выпуска и массы изготавливаемых изделий, руководствуясь нижеприведенной таблицей 1.

Таблица 1

Производство	Число обрабатываемых деталей в год		
	Массой более 100 кг	Массой от 10 до 100 кг	Массой до 10 кг
Единичное	До 5	До 10	До 100
Мелкосерийное	5-100	10-200	100-500
Серийное	100-300	200-500	500-5000
Крупносерийное	300-1000	500-5000	5000-50000
Массовое	Более 1000	Более 5000	Более 50000

Различают следующие типы производства

1. единичное ( $K_C > 40$ )
2. серийное
  - а) мелкосерийное ( $20 < K_C < 40$ )
  - б) среднесерийное ( $10 < K_C < 20$ )
  - в) крупносерийное ( $1 < K_C < 10$ )
3. массовое  $K_C \leq 1$

Производственные процессы по форме организации делятся на два вида:

- поточный;
- непоточный.

Под **поточным видом организации производственного** процесса понимается такой его вид, при котором заготовки, детали или собираемые изделия в процессе их производства находятся в движении, причем это движение осуществляется с постоянной величиной такта. Для организации поточного производства требуется одинаковая или кратная производительность на всех операциях.

Под **непоточным видом организации производственного процесса** понимается такой его вид при котором заготовки, детали или собираемые изделия в процессе их производства находятся в движении с различной продолжительностью операций и пролеживанием между ними, в результате чего процесс осуществляется с меняющейся величиной такта.

Поточная форма организации производства характерна для массового производства. При этом операции обработки или сбор-

ки машины закреплены за определенным оборудованием или рабочими местами, оборудование расположено в порядке выполнения операций, а изготавливаемая деталь передается с одной операции на следующую сразу после выполнения предшествующей операции. На линии поточного производства обработанные заготовки или собранные узлы выпускаются строго через такт выпуска.

Серийное производство также может быть организовано с использованием как поточного вида производства, так и непоточного. Отличительной особенностью поточного серийного производства является его периодичность во времени в связи с периодичностью запуска партии, поэтому оно получило название переменного-поточного производства.

Единичное производство всегда непоточное.

Критерием эффективности ТП является трудоемкость выполнения технологических операций, определяемая на основе технически обоснованных норм рабочего времени.

**Трудоемкость** определяется продолжительностью изготовления изделия при нормальной интенсивности труда в часах.

**Станкоемкость** характеризуется продолжительностью времени, в течение которого должны быть заняты станки или другое оборудование для изготовления всех деталей изделия. Единицей измерения станкоемкости обычно является станко-час.

Для разработки ТП изготовления машины необходимы следующие исходные материалы:

1. краткое описание служебного назначения машины;
2. рабочие чертежи машины;
3. данные о количестве машин, намеченных к выпуску.

ку в единицу времени;

4. технические условия и нормы, определяющие служебное назначение машины;

5. общее количество машин, намеченных к выпуску по неизменным чертежам;

6. условия, в которых предполагается организовать и осуществлять подготовку, изготовление и выпуск машин (вновь воздаваемый или действующий завод, имеющееся на нем оборудование, перспективы получения нового оборудования);

7. местонахождение завода;

8. наличие и перспективы получения кадров;

9. плановые сроки подготовки и освоения новой машины и организации ее выпуска.

## **2. Основы достижения качества изготовления машин и деталей**

### **2.1. Машина как объект производства**

Любую машину создают для выполнения конкретного технологического процесса или совокупности ТП. Своё предназначение машина в состоянии осуществлять, если будет обладать надлежащим качеством и будет экономичной.

Конструкция машины представляет собой сложную систему двух множеств связей - свойств материалов и размерных связей. Началом формирования качества машины (прибора) является определение и описание её служебного назначения.

### *Служебное назначение машины*

В формулировке служебного назначения машины, прежде всего, должна быть отражена общая задача, для решения которой создается машина. Далее следует расшифровка задачи, конкретизирующая назначение машины, условия эксплуатации и содержащая требования, обуславливающие её соответствие в техническом, экономическом, эргономическом и эстетическом смысле современному уровню.

Служебное назначение машины описывается словесно и с помощью системы количественных показателей с ограничениями допускаемых возможных отклонений от номинальных значений.

Существует следующая классификация требований:

1. Количественные показатели производимого машиной действия: скорость, мощность, производительность и т.д.

2. Количественные показатели объекта (предмета обработки), на который направлено действие машины: масса, габариты перемещаемых транспортной машиной грузов; физико-механические свойства обрабатываемых технологической машиной материалов, показатели качества обрабатываемых деталей или других предметов обработки и т.д.

3. Количественные показатели особых условий и ограничений, при которых машина выполняет свое служебное назначение: характеристики внешней среды (температура, запыленность, влажность и т.д.), надежность машины, вид и показатели исполь-

зующей энергии, экологическое воздействие на природу и т.д.

При уточнении служебного назначения машины могут быть использованы следующие источники:

1. Подробные данные о свойствах продукции (вид, материал, размеры, масса, требования к качеству и т.д.), для выпуска которой создают машину.

2. Данные о количественном выпуске продукции в единицу времени по неизменным чертежам.

3. Требования к стоимости продукции.

4. Данные об исходном продукте (вид, качество, количество и т.д.).

5. Сведения о технологическом процессе изготовления продукции.

6. Требования к производительности машины.

7. Условия, в которых должен осуществляться технологический процесс (температура, влажность, запыленность окружающей среды и т.д.).

8. Требования к надежности машины.

9. Требования к долговечности машины.

10. Требуемый уровень механизации и автоматизации.

11. Условия, гарантирующие удобство управления машиной, безопасность работы и обслуживания.

12. Требования к внешнему виду.

13. Вид, качество и источник потребляемой энергии.

Следует подчеркнуть особую важность работы по уточнению служебного назначения машины и составлению списка тре-

бований к ней на этапе разработки технического задания. Если в служебном назначении будет упущена хоть одна задача или в наборе требований не будет учтено и выполнено хоть одно требование, то в созданной затем машине проявится, по крайней мере, один существенный недостаток или же она будет вообще неработоспособной.

Приведем пример описания служебного назначения пылесоса. Универсальный электрический бытовой пылесос служит для сбора пыли и мелких частиц мусора с одежды, мебели, ковров, гардин, стен, потолков, пола, книг, радиоаппаратуры, распыления жидкостей. Мощность пылесоса регулируется в зависимости от производимых работ с целью экономии электроэнергии с помощью электронного регулятора мощности, который позволяет увеличивать или уменьшать силу всасывания. Пылесос имеет ряд узлов и устройств, повышающих надежность, качество производимых работ, удобство пользования. К ним относятся: электронный регулятор мощности; сменные фильтры разового заполнения, указатель заполнения пылесборника пылью; регулятор расхода воздуха; комплект насадок современной формы из ударопрочной пластмассы; колеса, обеспечивающие перемещение пылесоса; съемный электрический шнур. Пылесосом можно пользоваться в закрытом помещении при температуре окружающего воздуха от 1 до 40°C.

Технические характеристики

Номинальное напряжение, В; частота, Гц.....	220; 50
Номинальная потребляемая мощность, Вт.....	800
Род тока.....	переменный
Мощность всасывания, Вт, не менее.....	350
Класс защиты от поражения электрическим током.....	II (двойная изоляция)

Исполнение по степени защиты от влаги.....	незащищенное
Режим работы.....	продолжительный
Расход электроэнергии за 1 час работы, кВт·ч, не более.....	0,8
Масса пылесоса, кг, не более.....	5,5

*Качество и точность машины и детали*

Под качеством машины понимают совокупность свойств, определяющих соответствие ее служебному назначению и отличающих машину от других.

Ввиду огромного разнообразия машин нет и не может быть единого для всех набора показателей качества, поэтому выбор и обоснование такого набора для каждой новой машины составляют важнейшую задачу заказчика и конструктора уже на стадии формулирования и согласования технического задания. Естественно, что наряду с этим различными способами определяется и величина каждого из выбранных показателей качества.

Качество является важнейшей характеристикой машин.

Качество машины характеризуется определенной системой показателей, причем показатели делятся на эксплуатационные и производственно-технические.

Для достаточно большого ряда изделий, длительное время и в больших количествах выпускаемых промышленностью, разработаны наборы показателей качества и утверждены на уровне государственных стандартов. При разработке показателей качества на изделия рекомендуют ориентироваться на следующую их классификацию по группам:

- 1) показатели назначения;
- 2) показатели надежности;

- 3) эргономические показатели;
- 4) эстетические показатели;
- 5) показатели технологичности;
- 6) показатели транспортабельности;
- 7) показатели стандартизации и унификации;
- 8) патентно-правовые показатели;
- 9) экологические показатели;
- 10) показатели безопасности;
- 11) экономические показатели.

Существуют рекомендации по номенклатуре возможных показателей качества, относящихся к той или иной из вышеперечисленных групп. Например, показатели 1-ой группы – показатели назначения, рекомендуется выбирать из следующего списка:

- производительность;
- максимальная и минимальная скорости;
- мощность;
- маневренность;
- проходимость;
- чувствительность;
- содержание полезного вещества;
- содержание вредных примесей;
- минимально допустимая температура окружающего воздуха.

Конечно же этот список неполон. Так, например, в нем нет таких очень важных для любой технологической машины показателей назначения, как качество выпускаемого продукта или стабильность реализуемого в ней технологического процесса.

Так как в ходе проектирования конструктор преобразует все

виды связей между исполнительными поверхностями в размерные, в размерах деталей и машины в целом зашифрованы все или большинство показателей качества машины.

Выбор и назначение показателей качества машины можно и нужно считать одной из важнейших частей творческой работы конструктора. Не менее важной задачей является определение и назначение величины каждого из выбранных и включенных в систему оценки показателя качества машины, а также его допустимых отклонений. Без решения этой задачи нельзя серьезно говорить об обеспечении некоторого наперед заданного качества машины.

## 2.2. Точность изделия

Показателем качества машин, достижение и обеспечение которого вызывает наибольшие трудности и затраты в процессе создания и особенно в процессе изготовления машин, является точность машин. Поэтому рассмотрим вначале показатели, которыми характеризуется точность машины и ее деталей.

Под точностью детали или машины понимается степень ее приближения к геометрически правильному ее прототипу.

Изготовить любую деталь абсолютно точно, т. е. в полном соответствии с ее геометрическим представлением, практически невозможно, поэтому за меру точности принимают величины отклонений от теоретических значений. Эти отклонения после их измерения сопоставляют с отклонениями, допускаемыми служебным назначением детали в машине. Следовательно, по всем показателям качества детали, характеризующим ее служебное назна-

чение, необходимо устанавливать допустимые отклонения, или допуски.

Таким образом, мерами точности служат:

- устанавливаемые допустимые отклонения,
- измеренные (т. е. познанные с известной степенью приближения) действительные отклонения реальной детали.

Первым показателем точности детали является точность расстояния между какими-либо ее двумя поверхностями, или точность размеров поверхности детали, придающих ей те или иные геометрические формы (например, диаметр и длина цилиндрической поверхности).

Размер понимается как расстояние между двумя небольшими участками двух или одной поверхности, поэтому практически в подавляющем большинстве случаев безразлично, от которой из двух поверхностей или от какой из выбранных частей одной поверхности до другой производится измерение расстояния. В соответствии с этим размер принято изображать двусторонней стрелкой, соединяющей участки измеряемых поверхностей или одной поверхности.

Точность поворота одной поверхности относительно другой, выбранной за базу, служит вторым показателем точности детали. Так как деталь представляет собой пространственное тело, то точность поворота одной поверхности относительно другой обычно рассматривается в двух перпендикулярных координатных плоскостях.

Под **точностью поворота** понимается величина отклонения от требуемого углового положения одной поверхности относительно другой в каждой из двух координатных плоскостей.

В подавляющем большинстве случаев, встречающихся в практике, важно знать, которую из двух поверхностей следует расположить в том или ином угловом положении относительно другой поверхности или, другими словами, какую из поверхностей выбрать за базу. Это объясняется различием функций, выполняемых различными поверхностями детали при ее работе в машине.

Точность геометрических форм поверхностей детали, или правильность геометрических форм, понимается, как наибольшее приближение каждой из поверхностей детали к ее геометрическому представлению.

Различают три вида отклонений поверхностей деталей от их геометрических форм:

1) **макрогеометрические отклонения**, под которыми понимают отклонения реальной поверхности от правильной геометрической формы в пределах габаритных размеров этой поверхности; например, отклонение плоской поверхности от плоскостности.

2) **волнистость**, представляющая собой периодические неровности поверхности, встречающиеся на участках протяженностью от 1 до 10 мм;

3) **микрогеометрические отклонения** (микронеровности), под которыми понимаются отклонения реальной поверхности в пределах небольших ее участков.

Микрогеометрические отклонения называются шероховатостью поверхности.

На шероховатость поверхности утвержден ГОСТ, по которому принято 14 классов шероховатости поверхности в зависимости от величины среднеарифметического отклонения  $R_a$  и высоты не-

ровностей  $R_z$ . Выбирая тот или иной класс шероховатости поверхностей детали, тем самым устанавливают допуск на микроотклонения поверхностей от геометрически правильной формы.

Между всеми перечисленными выше показателями точности детали существуют качественные и количественные взаимосвязи. Пока можно говорить только о качественных связях, так как количественных (функциональных зависимостей), до сих пор в общем виде не установлено.

Рассмотренные выше показатели, характеризующие точность детали, целиком используются и для характеристики точности машины. Различие заключается только в том, что у детали все показатели точности относятся к поверхностям одной данной детали, у машины же они относятся к исполнительным поверхностям, принадлежащим различным связанным одна с другой деталям машины.

Поскольку исполнительные поверхности машины должны осуществлять относительное движение, необходимое для выполнения машиной ее служебного назначения, одним из основных показателей, характеризующих точность машины, является точность относительного движения исполнительных поверхностей.

Под **точностью относительного движения** понимается максимальное приближение действительного характера движения исполнительных поверхностей к теоретическому закону движения, выбранному исходя из служебного назначения машины.

Во многих машинах требуется обеспечить, например, постоянство передаточного отношения между исполнительными поверхностями во время работы машины.

Точность относительного движения характеризуется вели-

чиной надлежащего отклонения, на которое должен устанавливаться (как и на другие показатели точности) допуск.

Исходя из изложенного выше, точность машины характеризуется следующими основными показателями:

- точностью размеров исполнительных поверхностей;
- точностью геометрической формы исполнительных поверхностей;
- шероховатостью исполнительных поверхностей;
- точностью взаимного расположения исполнительных поверхностей;
- точностью относительного движения исполнительных поверхностей.

#### *Другие показатели качества машины*

В дополнение к основному показателю качества машины и ее деталей - точности — имеется ряд других. К ним, например, относится физико-химическое состояние и физико-механические свойства поверхностного слоя материала, из которого сделаны детали машины.

Под физико-механическими свойствами поверхностного слоя понимаются твердость, величина и знак остаточных напряжений и др. В необходимых случаях на отклонения показателей каждого из этих свойств следует устанавливать надлежащие допуски, исходя из служебного назначения детали в машине. Одной из задач технологии машиностроения является изготовление деталей, фактические отклонения которых не выходили бы из пределов всех установленных допусков.

К показателям качества машины также относят:

- производительность в смену (или другой более длительный промежуток времени), выражаемая или в штуках продукции, отвечающей установленным качественным требованиям, или в других единицах измерений (кубометрах вынутого грунта и т. д.).

- расход горючего и смазки на единицу пути и ряд других.

- коэффициент полезного действия машины, как известно, представляет собой один из комплексных показателей, характеризующих как конструкцию машины, так и технологию ее изготовления. Поэтому при изготовлении машины данной конструкции колебания установленного для нее КПД зависят в наибольшей степени от качества изготовления машины. В соответствии с этим на величину КПД машины в практике многих заводов устанавливается надлежащий допуск.

- легкость управления, которая для данной конструкции машины также зависит от качества ее изготовления и т.д.

Установление оптимальных на данном уровне развития техники (на определенный промежуток времени) допусков на каждый из рассмотренных выше показателей качества машины и ее механизмов представляет одну из наиболее ответственных задач машиностроения, имеющую большое народнохозяйственное значение. Действительно, с уменьшением допусков на показатели качества машины, например, на показатели, характеризующие ее точность, физико-механические свойства поверхности слоев материала и другие, машина будет работать экономичнее. Однако это вызовет, с одной стороны, увеличение затрат на ее изготовление, с другой - повысит расходы на эксплуатацию ввиду необходимости в более частых ремонтах для восстановления требуемого качества машины.

Таким образом, допуски на все показатели качества машины должны устанавливаться на основе технико-экономических расчетов, имеющих в виду достижение наименьших затрат общественно необходимого труда на решение задач, для выполнения которых создается данная машина. При этом не следует забывать, что средства производства непрерывно развиваются и совершенствуются, вследствие чего, с одной стороны, непрерывно растут требования к качеству машин, а с другой, — создается возможность обеспечивать повышение качества с наименьшими затратами труда.

Допуски на все показатели точности машины, установленные исходя из ее служебного назначения, делятся обычно на две части:

- 1) допуск на изготовление, в пределах которого должен обеспечить размер технолог;
- 2) допуск на изменение размера во время эксплуатации за счет износа деталей.

В этом вопросе в противоречие вступают интересы потребителей и производителей машин. Противоречие разрешается на основе интересов общества, т. е. достижения наименьших затрат общественного труда. Неправильное решение этой задачи в ряде случаев приводит к тому, что новая машина через короткое время эксплуатации теряет возможность выполнять свое служебное назначение, так как завод-изготовитель использовал большую долю допусков на изготовление машины и почти ничего не оставил на ее износ.

Части допусков, предназначенные на изготовление машины, принято называть допусками на приемку готовой машины в рабо-

чем состоянии.

### *Методы достижения точности при механической обработке*

Для процесса производства изделий точность имеет важное значение. Повышение точности исходных заготовок снижает трудоемкость механической обработки, уменьшает размеры припусков на обработку деталей и приводит к экономии металла. Получение точных и однородных заготовок на всех операциях технологического процесса является одним из неперенных условий автоматизации обработки.

Повышение точности механической обработки устраняет пригоночные работы при сборке, позволяет осуществить принцип взаимозаменяемости деталей и узлов и ввести поточную сборку, что не только сокращает трудоемкость сборки, но также облегчает и удешевляет проведение ремонта машин в условиях их эксплуатации.

При решении проблемы точности в машиностроении технолог должен:

- обеспечить требуемую конструктором точность изготовления деталей и сборки машины при одновременном достижении высокой производительности и экономичности их изготовления;
- обеспечить необходимые средства измерения и контроля фактической точности обработки и сборки; установку допусков технологических межоперационных размеров и размеров исходных заготовок и их выполнение в ходе технологического процесса.
- исследовать фактическую точность установленных техно-

логических процессов и проанализировать причины возникновения погрешностей обработки и сборки.

Заданную точность обработки заготовки можно достигнуть одним из двух принципиально отличных методов:

- 1) методом пробных ходов и промеров,
- 2) методом автоматического получения размеров на настроенных станках.

### *Метод пробных ходов и промеров*

Сущность метода заключается в том, что к обрабатываемой поверхности заготовки, установленной на станке, подводят режущий инструмент и с короткого участка заготовки снимают пробную стружку. После этого станок останавливают, делают пробный замер полученного размера, определяют величину его отклонения от чертежного и вносят поправку в положение инструмента, которую отсчитывают по делениям лимба станка. Затем вновь производят пробную обработку («ход») участка заготовки, новый пробный замер полученного размера и при необходимости вносят новую поправку в положение инструмента. Таким образом, путем пробных ходов и промеров устанавливают правильное положение инструмента относительно заготовки, при котором обеспечивается требуемый размер. После этого выполняют обработку заготовки по всей ее длине. При обработке следующей заготовки всю процедуру установки инструмента пробными ходами и промерами повторяют.

В методе пробных ходов и промеров часто применяют разметку. В этом случае на поверхность исходной заготовки специ-

альными инструментами (чертилками, штангенрейсмусом и др.) наносят тонкие линии, показывающие контур будущей детали, положение центров будущих отверстий или контуры выемок и окон. При последующей обработке рабочий стремится совместить траекторию перемещения режущего лезвия инструмента с линией разметки заготовки и обеспечить тем самым требуемую форму обрабатываемой поверхности.

Метод пробных ходов и промеров имеет следующие достоинства:

1. на неточном оборудовании позволяет получить высокую точность обработки; рабочий высокой квалификации путем пробных промеров и ходов может определить и устранить погрешность заготовки, возникшую при ее обработке на неточном станке;

2. при обработке партии мелких заготовок исключает влияние износа режущего инструмента на точность выдерживаемых при обработке размеров; при пробных промерах и ходах определяют и вносят необходимую поправку в положение инструмента, требуемую в связи с износом последнего;

3. метод позволяет правильно распределить припуск и предотвратить появление брака; из маломерной заготовки при разметке часто удается выкроить контур обрабатываемой детали и получить годное изделие;

4. метод освобождает рабочего от необходимости изготовления сложных и дорогостоящих приспособлений типа кондукторов, поворотных и делительных приспособлений и др.; положение центров отверстий и взаимное расположение обрабатываемых поверхностей предопределяется разметкой.

Вместе с тем метод пробных ходов и промеров имеет ряд серьезных недостатков:

1. зависимость достигаемой точности обработки от минимальной толщины снимаемой стружки; при токарной обработке доведенными резцами эта толщина не меньше 0,005 мм, а при точении обычно заточенными резцами она составляет 0,02 мм (при некотором затуплении резца даже 0,05 мм); очевидно, что при работе пробными ходами рабочий не сможет внести в размер заготовки поправку менее толщины снимаемой стружки, а следовательно, и гарантировать получение размера с погрешностью, меньшей этой толщины;

2. появление брака по вине рабочего, от внимания которого в значительной степени зависит достигаемая точность обработки;

3. низкую производительность обработки из-за больших затрат времени на пробные ходы, промеры и разметку;

4. высокую себестоимость обработки детали вследствие низкой производительности обработки в сочетании с высокой квалификацией рабочего, требующей повышенной оплаты труда.

В связи с перечисленными недостатками метод пробных промеров и ходов используется, как правило, при единичном или мелкосерийном производстве изделий, в опытном производстве, а также в ремонтных и инструментальных цехах.

Особенно часто этот метод применяется в тяжелом машиностроении. При серийном производстве этот метод находит применение для получения годных деталей из неполноценных исходных заготовок («спасение» брака по литью и штамповке). В условиях крупносерийного и массового производства метод пробных ходов и промеров используется главным образом при шлифовании, так

как позволяет без труда компенсировать износ абразивных инструментов.

*Метод автоматического получения размеров на настроенных станках*

Этот метод в значительной мере свободен от недостатков, свойственных методу пробных ходов и промеров.

При обработке заготовок по методу автоматического получения размеров станок предварительно настраивается таким образом, чтобы требуемая от заготовок точность достигалась автоматически, т. е. почти независимо от квалификации и внимания рабочего.

При использовании метода автоматического получения размеров на настроенных станках задача обеспечения требуемой точности обработки переносится с рабочего-оператора на настройщика, выполняющего предварительную настройку станка; на инструментальщика, изготавливающего специальные приспособления, и на технолога, назначающего технологические базы и размеры заготовки, а также определяющего метод ее установки и крепления и конструкцию необходимого приспособления.

К преимуществам метода автоматического получения размеров относятся:

1. повышение точности обработки и снижение брака; точность обработки не зависит от минимально возможной толщины снимаемой стружки (так как припуск на обработку на настроенном станке устанавливается заведомо больше этой величины) и от квалификации и внимательности рабочего;

2. рост производительности обработки за счет устранения потерь времени на предварительную разметку заготовки и осуществление пробных ходов и промеров; кроме того, специалист, работающий на настроенном станке по упорам, а не по пробным промерам, проводит работу более уверенно и спокойно; в процессе обработки возникает определенный ритм целесообразных и продуманных движений, дающих наименьшую утомляемость и высокую производительность;

3. рациональное использование рабочих высокой квалификации; работу на настроенных станках могут производить ученики и малоквалифицированные рабочие-операторы, а в дальнейшем с ростом автоматизации производственных процессов она будет полностью возложена на станки-автоматы и промышленные роботы; высококвалифицированные рабочие выполняют настройку станков и обслуживают одновременно по 8—12 станков;

4. повышение экономичности производства; высокая производительность труда, снижение брака, уменьшение потребности в высококвалифицированной рабочей силе способствуют снижению производственных затрат и общему повышению экономичности производства.

Преимущества метода автоматического получения размеров на настроенных станках определяют его широкое распространение в условиях серийного и массового производства.

Использование этого метода в условиях мелкосерийного производства ограничивается некоторыми экономическими соображениями: потери времени на предварительную настройку станков могут превзойти выигрыш времени от автоматического получения размеров; затраты на изготовление однородных и точных

исходных заготовок, требуемых для работы на настроенных станках, могут не окупиться при малых количествах выпускаемой продукции; тщательная технологическая подготовка производства с подробной разработкой технологических процессов и схем настройки станков неосуществима в условиях мелкосерийного и многономенклатурного производства.

Каждый из рассмотренных методов достижения заданной точности при мехобработке неизбежно сопровождается погрешностями обработки, вызываемыми различными причинами систематического и случайного характера. Соответственно погрешности, возникающие вследствие этих причин, подразделяются на систематические и случайные.

### 2.3. Базирование сборочных единиц и деталей

Вопросы определения положения одной детали относительно другой приходится решать на всех этапах создания машины: конструктору при проектировании, технологу при сборке и механической обработке деталей, контролеру при измерении. Эти вопросы решаются на основе теории базирования.

**Базированием** называется придание изделию или заготовке требуемого положения относительно выбранной системы координат (ГОСТ 21495-76).

Из теоретической механики известно, что требуемое положение или движение твердого тела относительно выбранной системы координат достигается наложением геометрических или кинематических связей. Под связями подразумеваются ограничения позиционного (геометрического) или кинематического характера, налагаемые на возможные движения точек рассматриваемого типа.

В трехмерном пространстве любое твердое тело имеет шесть степеней свободы, т.е. возможность движения в одном из трех координатном направлении: поступательное перемещение вдоль каждой из трех координатных осей и вращение вокруг этих же осей. Накладываемое на каждое из этих движений ограничение может либо полностью отнимать возможность движения, и тогда речь идет о связи позиционной (геометрической), либо устанавливать закон этого движения, в соответствии с которым определяется положение твердого тела в каждый заданный момент времени, и тогда речь идет о связи кинематической.

Рассмотрим схему установки вала в редукторе в подшипниках качения (рис.1).

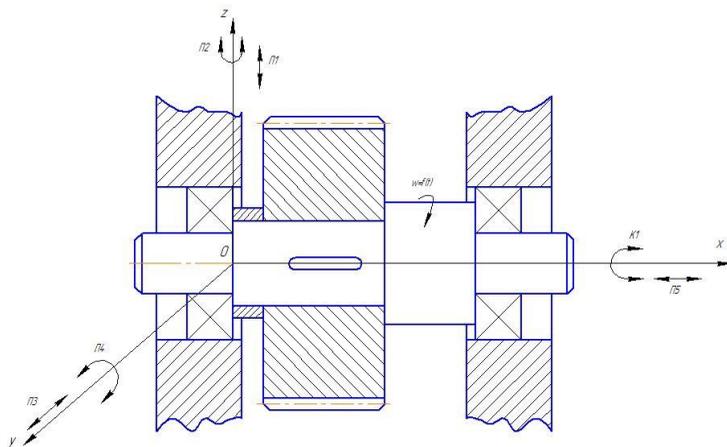


Рис. 1. Схема установки вала в редукторе с указанием позиционных и кинематических связей

Выбранная система координат OXYZ (рис.1) связана с общей осью отверстий подшипников и торцом подшипника. Эта конструкция налагает на вал пять позиционных связей П1-П5 и одну кинематическую К1 - вращение вала вокруг оси OX, которое задается законом  $\omega=f(t)$ .

Из теоретической механики известно, что для позиционирования твердого тела в трехмерной системе координат необходимо и достаточно наложить на него шесть жестких двухсторонних координатных связей (теорема «Правило шести точек»). Такую связь условно можно представить в виде абсолютно жесткого (недеформируемого) стержня между точкой твердого тела и координатной плоскостью, который неразрывно связан с телом и координатной плоскостью, но в то же

время может скользить по ней, не теряя контакта. Рассмотрим схему позиционирования призматической детали относительно выбранной системы координат  $OXYZ$  (см. рис.2).

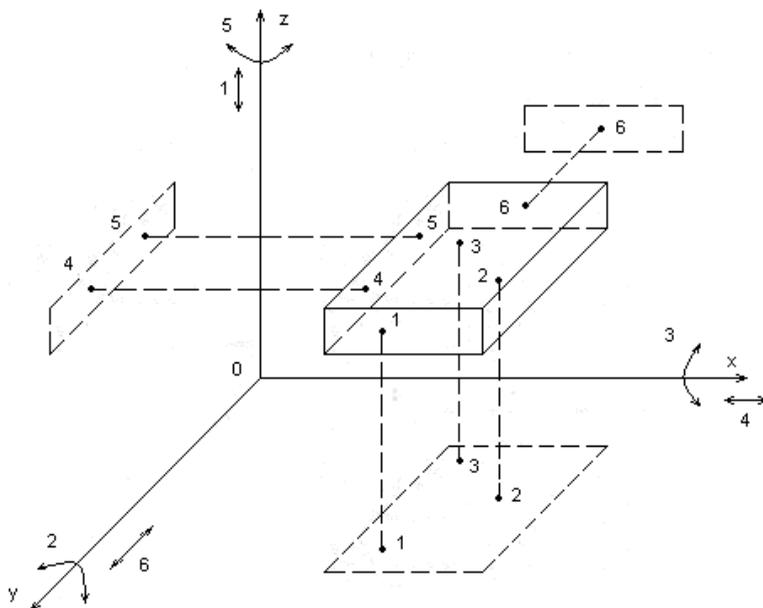


Рис.2. Схема позиционирования призматической детали

В точках 1-6, расположенных на плоскостях детали, приложены координатные связи, лишаящие деталь всех шести возможных перемещений. Такие точки принято называть опорными. Связи 1-1, 2-2, 3-3 (см. рис.2) лишают деталь перемещения вдоль оси  $OZ$  и двух поворотов вокруг осей  $OY$  и  $OX$ , связи 4-4, 5-5 лишают деталь перемещения вдоль оси  $OX$  и поворотов вокруг оси  $OZ$ , связь 6-6 лишает деталь перемещения вдоль оси  $OY$ .

Схему расположения опорных точек на детали называют **схемой базирования**, и опорные точки обозначаются специаль-

ными значками (рис.3).

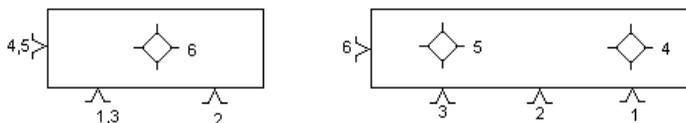


Рис.3. Схема базирования призматической детали

Опорные точки располагаются на базах детали. **База** – это поверхность или выполняющие ту же функцию сочетание поверхностей, ось, точка, принадлежащие детали (заготовке, изделию) и используемые для базирования.

#### Классификация баз

**По назначению** различают базы: конструкторские, технологические и измерительные.

**Конструкторской** называют базу, используемую для определения положения детали (или СЕ) в изделии или положение отдельной поверхности на детали. Конструкторская база бывает трех разновидностей: основная, вспомогательная, размерная.

**Основной** называют конструкторскую базу, принадлежащую данной детали (или СЕ) и используемую для определения её положения в СЕ (изделии).

**Вспомогательной** называют конструкторскую базу, принадлежащую данной детали (или СЕ) и используемую для определения положения присоединяемого к ней изделия. Комплект основной базы принадлежит всегда одной детали, положение которой определяется в машине. Комплект вспомогательных баз

может состоять из поверхностей, принадлежащих разным деталям.

*Размерной* называют конструкторскую базу (рис.4), принадлежащую данной детали и используемую для определения положения других её поверхностей или элементов.

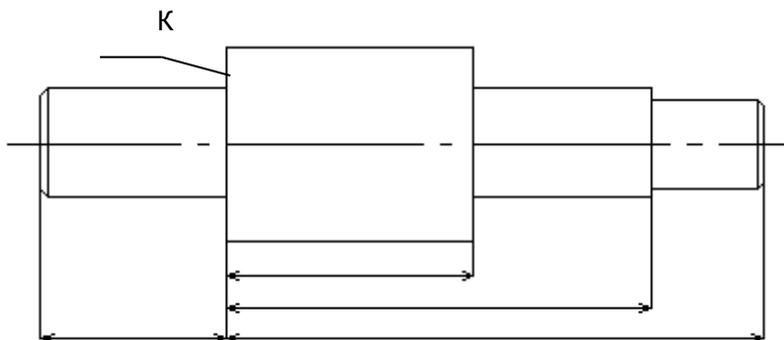


Рис.4. Размерные базы вала

**Технологической** называют базу, используемую для определения положения заготовки или изделия в процессе его изготовления или ремонта.

Приведем схему базирования заготовки при фрезеровании паза призматической детали на вертикально-фрезерном станке (рис.5). Призматическая деталь 1 устанавливается в приспособление 2 фрезерного станка по трем базовым поверхностям А, Б и В, которые реализуют схему базирования, приведенную на рис. 4. Фреза 3 обрабатывает поверхности паза на детали, обеспечивая размеры обработки К и М.

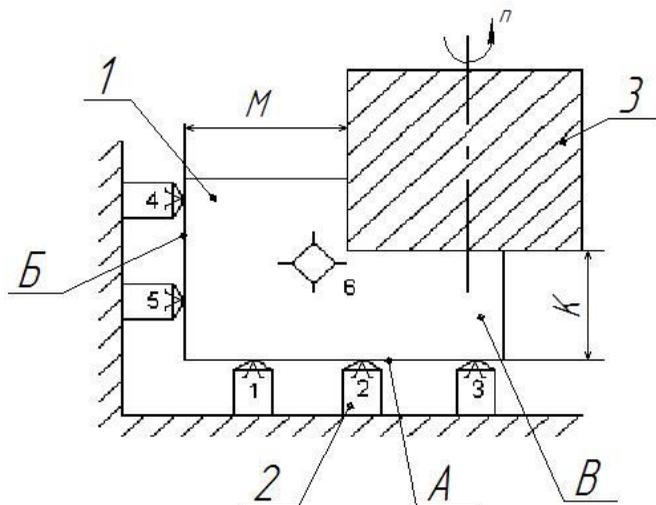


Рис. 5. Схема базирования заготовки при фрезеровании

**Измерительной** называют базу (рис.6), используемую для определения относительного положения заготовки или изделия и средств измерения.

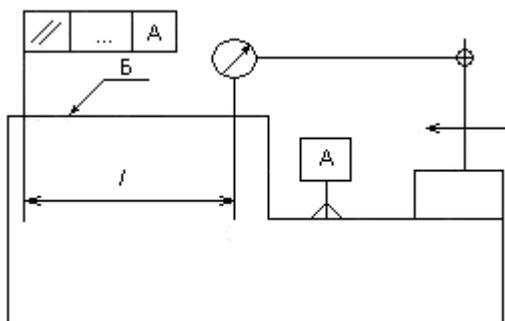


Рис.6. Схема измерения параллельности плоскости Б к плоскости А (измерительная база)

Поверхность детали А используется для определения положения индикаторной стойки при измерении параллельности плоскости Б к А. При перемещении стойки по поверхности А в направлении стрелки разность показаний индикатора представляет собой катет прямоугольного треугольника на длине L.

**По числу отнимаемых степеней свободы** различают базы: установочную, направляющую, опорную, двойную направляющую, двойную опорную, опорно-направляющую, тройную опорную.

**Установочной** называют базу, лишающую изделие трех степеней свободы: перемещения вдоль одной координатной оси и вращения вокруг двух других осей (опорные точки 1,2,3 на рис.3). В качестве установочной базы следует использовать поверхность наибольших габаритов.

**Направляющей** называют базу, лишающую изделие двух степеней свободы: перемещения вдоль одной координатной оси и вращения вокруг другой оси (опорные точки 4,5 на рис.3). В качестве направляющей базы следует использовать поверхность наибольшей протяженности при небольшой ее ширине.

**Опорной** называют базу, лишающую изделие одной степени свободы: перемещения вдоль одной координатной оси или вращения вокруг оси (опорная точка 6 на рис.3). В качестве опорной базы используют поверхность небольшого габаритного размера.

**Двойной направляющей** называют базу (рис.7), лишающую изделие четырех степеней свободы: перемещений вдоль двух координатных осей и вращения вокруг этих же осей. Примером такой базы может служить ось вала.

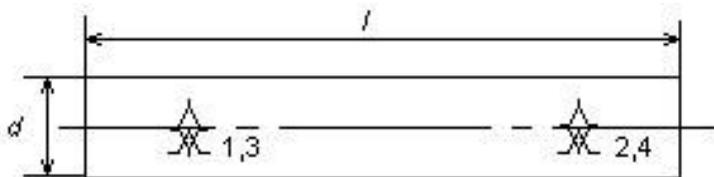


Рис. 7. Схема базирования вала

Опорные точки 1,2,3,4 лежат на одном элементе - оси симметрии вала. Эту же функцию может выполнять цилиндрическая поверхность. В качестве двойной направляющей базы следует использовать осесимметричную поверхность наибольшей длины. Цилиндр может служить двойной направляющей базой при соотношении его длины и диаметра  $\frac{l}{d} > 1$ .

**Двойной опорной** называют базу, лишаящую изделие двух степеней свободы: перемещений вдоль двух координатных осей. В двойную опорную превращается двойная направляющая база в том случае, когда соотношение  $\frac{l}{d} \leq 1$  (рис.8).

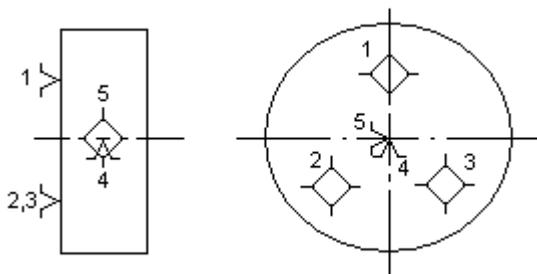


Рис.8. Схема базирования диска

**Опорно-направляющей** называют базу, лишающую изделие пяти степеней свободы: перемещения вдоль трех осей координат и вращений вокруг двух из них. Функцию такой базы выполняет коническая поверхность большой длины и относительно малой конусности.

**Тройной опорной** называют базу, лишающую изделие трех степеней свободы: перемещения вдоль трех координатных осей. По аналогии с двойной опорной такая база получается из опорно-направляющей при резком уменьшении длины конуса и увеличении его угла.

**По конструктивному оформлению** базы бывают явные и скрытые.

**Явной** называют базу изделия в виде реальной поверхности, разметочной риски или точки пересечения рисков.

**Скрытой** называют базу изделия в виде воображаемой плоскости, оси или точки. Примером такой базы служит ось вала.

#### *Неопределенность базирования*

Требуемое положение базируемой детали достигается, когда её основные базы входят в контакт в опорных точках со вспомогательными базами других деталей. Однако в конструкции машин нередки случаи, когда при реализации принятой схемы базирования базируемой детали предоставляется возможность однократного или многократного изменения своего положения относительно выбранной системы координат. В этом случае говорят о наличии неопределенности в схеме базирования.

Неопределенность базирования вводится в схемы базирования для достижения двух целей. Во-первых, некоторым деталям для выполнения их служебного назначения необходима подвижность в одном или нескольких координатных направлениях, во-вторых, с технологической точки зрения для упрощения и облегчения процессов сборки всегда желательно иметь соединение деталей с гарантированными зазорами.

Явление неопределенности базирования всегда снижает точность позиционирования за счет погрешности положения базируемой детали.

Погрешность неопределенности базирования  $\omega_{н.б.}$  по физической природе представляет собой поле возможных смещений базируемой детали, возникающих в том случае, когда при реализации схемы базирования этой детали представляется в определенных пределах возможность неуправляемо (случайно) менять свое положение.

### 3. Метрологические основы дисциплины «ОТМ»

#### 3.1. Отклонения показателей точности изделия

Под **качеством машины** понимают совокупность свойств, определяющих соответствие ее служебному назначению и отличающих машину от других.

Под **точностью машины** и детали понимают степень их приближения к геометрически правильному прототипу.

Общепринятой мерой точности размера является его отклонение  $E$  от номинального (заданного) значения. (Будем вести речь о точности размера, подразумевая под этим любой показатель точности машины).

$$E = A_p - A_0 \quad , \quad (4)$$

где  $A_p$  - реальное (измеренное) значение размера  $A$ ;  $A_0$  - номинальное (заданное) значение размера  $A$ .

Показатель  $E$  определяет степень приближения изделия к его геометрически правильному прототипу.

Значительно сложнее такую оценку дать некоторой совокупности изделий. Дело в том, что реальные размеры у разных изделий в партии деталей, изготовленных по одному и тому же технологическому процессу, не идентичны.

Технологический процесс обработки партии деталей не остается постоянным: части системы претерпевают износ, неравномерный нагрев, имеют разные рабочие нагрузки и т.д. На входе в технологическую систему загружаются заготовки и подается энергия. Качество заготовок (полуфабрикатов) не остается постоянным в партии: колеблются их размеры, показатели физико-механических свойств, состава и структуры материала и т.д. Количество энергии, подаваемой в систему в единицу времени, также колеблется.

Все эти колебания носят случайный характер, неизбежно изменяют результат технологического процесса - показатели точности изделия. Это явление получило название рассеяния показателей точности изделий.

Нас интересует, каким образом можно количественно описать точность партии изготовленных изделий, т.е. оценить степень их соответствия геометрически правильному прототипу.

Конечно, можно для каждого изделия определить величину  $E$  и составить список отклонений, но пользоваться такой громоздкой оценкой точности партии изделий очень неудобно. Поэтому в практике машиностроения для количественной оценки рассеяния используют показатели теории вероятности и математической статистики. Рассеяние размера в партии изделий характеризуется прежде всего величиной поля рассеяния  $\omega$ , определяемой как разность реальных максимального и минимального размеров:

$$\omega = A_{\max} - A_{\min}, \quad (5)$$

Для описания всей совокупности полученных в пределах поля рассеяния  $\omega$  размеров необходимо определить положение этого поля относительно номинального значения размера  $A_0$ . Это можно сделать с помощью любого из трех отклонений: минимального  $E_i \omega A$ , максимального  $E_s \omega A$  или среднего  $E_c \omega A$ , как это показано на рис. 9. Таким образом, размеры всех изделий в партии можно описать одним из следующих наборов трех величин:

- 1 вариант -  $A_0, E_i \omega A, \omega A$
- 2 вариант -  $A_0, E_s \omega A, \omega A$
- 3 вариант -  $A_0, E_c \omega A, \omega A$
- 4 вариант -  $A_0, E_i \omega A, E_s \omega A$

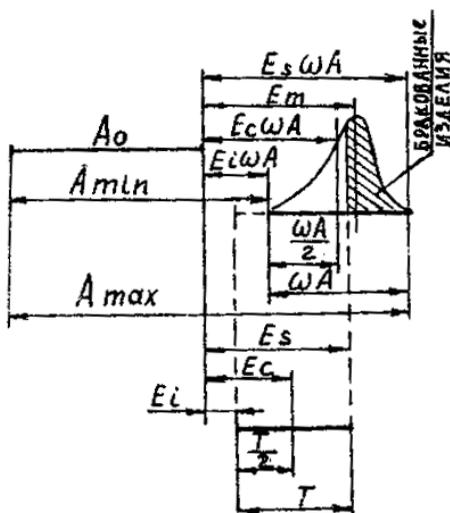


Рис. 9 Показатели точности размера  $A$  в партии изготавливаемых деталей

Эти варианты в случае необходимости легко преобразуются один в другой.

Границы допустимых отклонений показателей качества называются **допуском**. Допуск устанавливают в соответствии с требованиями заказчика. Установление значения допуска всегда предшествует осуществлению процесса.

Установление оптимальных на данном уровне развития техники допусков – это одна из наиболее сложных и ответственных задач машиностроения. С одной стороны, при уменьшении допуска изделие будет работать лучше, однако стоить будет дороже, т.е. допуски на показатели качества должны устанавливаться на основе технико-экономических расчетов, обеспечивающих

наименьшие затраты на производство.

Любой размер имеет номинальное значение и поле допуска (это ограниченное поле рассеяния размера, внутри которого располагается множество размеров изделия, обеспечивающих заданное качество работы). Поле допуска ограничивается верхним и нижним отклонением.

Можно провести параллель между номинальным размером  $A_0$ , полем допуска  $TA$ , нижним допускаемым отклонением  $E_i$ , верхним допускаемым отклонением  $E_s$ : величины  $TA$ ,  $E_i$ ,  $E_s$  выступают как ограничения для  $\omega$ ,  $E_i\omega$  и  $E_s\omega$ .

Из схемы на рис. 9 можно сделать вывод, что технологический процесс получения размера  $A$  приемлем и обеспечивает заданную точность, если выполняются следующие условия:

$$\omega A \leq TA \quad (6)$$

$$E_i \omega A \geq E_i \quad (7)$$

$$E_s \omega A \leq E_s \quad (8)$$

Условие (6) является основным; если оно не выполняется, технологический процесс, в принципе, не обеспечивает 100%-ую годность всех прошедших через него изделий. Нарушение условий (7) и (8) при соблюдении условия (6) означают смещение поля  $\omega$  относительно заданного конструктором положения поля допуска  $T$ , что может приводить к выходу в брак части изделий. Такая ситуация показана на рис. 9, где размеры обработанных деталей, попавших в заштрихованную зону, оказываются бракованными.

В этом случае, а также при нарушении условия (6) возникает необходимость расчетной оценки количества изделий, вышедших за пределы установленного допуска. Кроме этого, есть технологические задачи, в которых необходимо определять количество изделий с тем или иным размером в пределах поля рассеяния  $\omega$ . Для этого используют численные характеристики распределения случайной величины.

Распределение размеров – это совокупность размеров изделий, расположенных в возрастающем порядке с указанием частоты повторения этих размеров. Распределение размеров можно представить в виде таблицы или графика.

Для построения таблиц и графиков поле рассеяния  $\omega$  разбивают на некоторое количество равных интервалов и подсчитывают количество изделий, размеры которых попадают в каждый интервал. По результатам этой работы заполняют таблицу.

Таблица 2

мм	Интервал,	Частота появления размера $m$	Вероятность появления размера $P$
	20.00-20.05	2	2
	20.05-20.10	11	11
	20.10-20.15	19	19
	20.15-20.20	28	28
	20.20-20.25	22	22
	20.25-20.30	15	15
	20.30-20.35	3	3
Итого:		$n = \sum m = 100$	$P = 100\%$

Информация о распределении из таблицы может быть представлена и в виде графика. Для этого по оси абсцисс откладывают размер и отмечают интервалы (в соответствии с составленной ранее таблицей). По оси ординат откладывают частоты появления размеров или вероятности их появления. В результате построения получается ступенчатая диаграмма, которая называется гистограммой распределения. Если последовательно соединить точки, соответствующие середине каждого интервала, то получится ломаная линия. С увеличением количества интервалов (т.е. уменьшением величины каждого интервала) ломаная линия превращается в плавную кривую, которая называется кривой рассеяния. Аналитическое выражение такой кривой рассеяния называется законом распределения и записывается в виде функции.

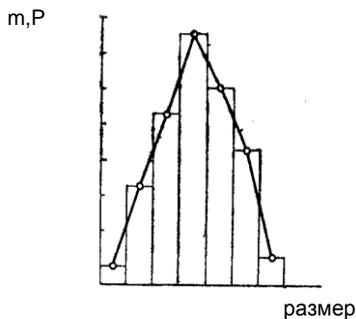


Рис.10. Распределение размеров

Распределение реальных размеров, полученных в различных технологических процессах и разных производственных условиях, может быть описано различными законами распределения из числа рассматриваемых в теории вероятностей. Многочисленные исследования точности технологических процессов механической обработки и сборки, показывают, что чаще всего с достаточной степенью приближения реальные процессы рассеяния показателей точности могут быть описаны одним из следующих законов:

1. нормального распределения (закон Гаусса),
2. равнобедренного треугольника (закон Симпсона),
3. равной вероятности,
4. закон эксцентриситета (закон Релея), либо некоторой композицией из этих законов.

Рассмотрим подробнее каждый из перечисленных законов.

#### *Закон нормального распределения (Гаусса)*

Исследования ученых показали, что распределение действительных размеров заготовок, обработанных на настроенных станках, очень часто подчиняется закону нормального распределения (закону Гаусса).

Это объясняется известным положением теории вероятностей о том, что распределение суммы большого числа взаимно независимых случайных слагаемых величин (при ничтожно малом и примерно одинаковом влиянии каждой из них на общую сумму и при отсутствии влияния доминирующих факторов) подчиняется закону нормального распределения Гаусса.

Результирующая погрешность обработки обычно формируется в результате одновременного воздействия большого числа погрешностей, зависящих от станка, приспособления, инструмента и заготовки, которые по существу представляют собой взаимно независимые случайные величины; влияние каждой из них на результирующую погрешность имеет один порядок, поэтому распределение результирующей погрешности обработки, а значит, и распределение действительных размеров обрабатываемых заготовок подчиняются закону нормального распределения.

Уравнение кривой нормального распределения имеет следующий вид

$$y = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(L_i - L_{cp})^2}{2\sigma^2}}, \quad (9)$$

где  $\sigma$  - среднее квадратичное отклонение, определяемое по формуле

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n}(L_i - L_{cp})^2 m_i} \quad (10)$$

$L_i$  - текущий действительный размер,

$L_{cp}$  - среднее арифметическое значение размеров данной

партии изделий,

$n$  - количество заготовок в партии,

$m$  - частота появления размера (количество заготовок в данном интервале размеров).

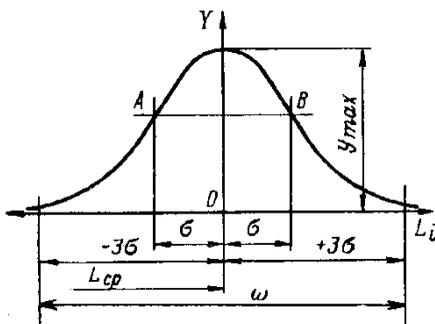


Рис. 11. Закон нормального распределения

Кривая, характеризующая закон нормального распределения показана на рис. 11. Она симметрична относительно оси ординат. Кривая в бесконечности приближается к оси абсцисс. На расстоянии  $\pm 3\sigma$  от положения вершины её ветви так близко подходят к оси абсцисс, что в этих пределах оказывается 99,73% площади, заключенной между всей кривой нормального распределения и осью абсцисс.

Закон нормального распределения в большинстве случаев оказывается справедлив при механической обработке заготовок с точностью 8-10 квалитет и выше.

### *Закон равнобедренного треугольника (закон Симпсона)*

При обработке заготовок с точностью 6-8 квалитетов распределение их размеров в большинстве случаев подчиняется закону Симпсона, который графически выражается равнобедренным треугольником с полем рассеяния  $\omega \approx 4.9\sigma$  ( $\sigma$  определяется также, как и при нормальном распределении).

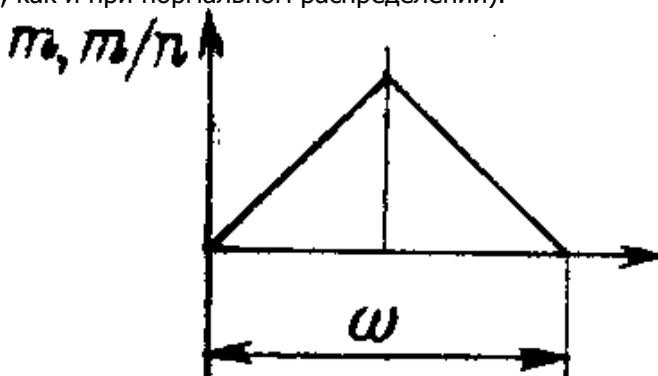


Рис.12. Закон равнобедренного треугольника

### *Закон равной вероятности*

Если рассеяние размеров зависит только от переменных систематических погрешностей, к которым относятся неточность, износ и деформация станков, приспособлений и инструментов, деформация обрабатываемых заготовок, тепловые явления при обработке, погрешности теоретической схемы обработки, то распределение размеров партии обработанных заготовок подчиняется закону равной вероятности.

Закон равной вероятности распространяется на распределение размеров заготовок повышенной точности (5—6-й квалитеты и выше) при их обработке по методу пробных ходов. Из-за сложности получения размеров очень высокой точности вероятность попадания размера заготовки в узкие границы допуска по среднему наибольшему или наименьшему его значению становится одинаковой.

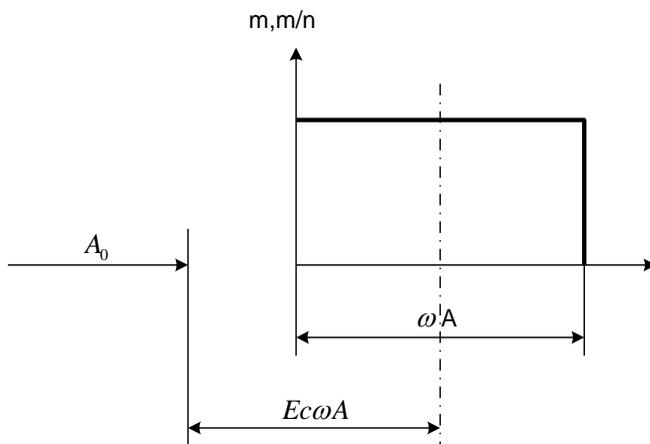


Рис. 13. Закон равной вероятности

### *Закон эксцентриситета (закон Релея)*

Распределение таких существенно положительных величин, как эксцентриситет, биение, разностенность, непараллельность, неперпендикулярность, овальность, конусообразность и некоторых других, характеризующихся их абсолютными значениями (т. е. без учета знака), подчиняется закону распределения эксцентриситета (закону Релея).

Распределение по закону Релея формируется (в частности) тогда, когда случайная величина  $R$  является радиус-вектором, т. е. если она представляет собой геометрическую сумму двух случайных величин  $x$  и  $y$

$$R = \sqrt{x^2 + y^2}. \quad (11)$$

Закон распределения Релея однопараметрический и уравнение его кривой распределения имеет вид

$$y = \frac{R^2}{\sigma^2} e^{-R^2/(2\sigma^2)}, \quad (12)$$

где  $\sigma$  - среднее квадратичное отклонение значений координат  $x$  и  $y$ .

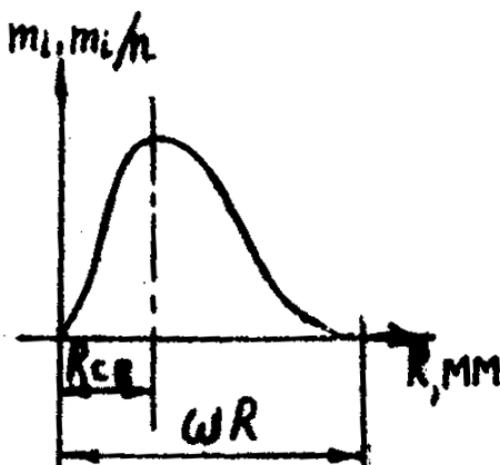


Рис. 14 Закон эксцентриситета

### 3.2. Размерные связи в машине. Теория размерных цепей

Физической моделью процесса формирования показателя точности машины как размера между её исполнительными поверхностями является размерная цепь. Согласно РД 50-635-87 «Цепи размерные» под **размерной цепью** понимают замкнутый контур расположенных друг за другом независимых размеров, участвующих в решении задачи по обеспечению заданного показателя точности машины.

Из определения размерной цепи следует, что размерную цепь образует замкнутый контур не любых размеров, а только тех размеров, которые непосредственно участвуют в решении задачи. Например, если поставлена задача обеспечить зазор между зубчатым колесом и торцом проставочного кольца, то только разме-

ры, нанесенные на чертеж (рис. 15), участвуют в обеспечении необходимого зазора и никакие другие размеры (например, ширина корпусной детали).

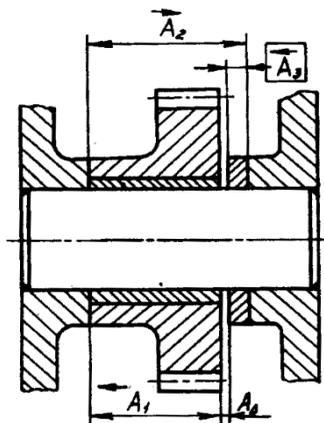


Рис. 15 Размерная цепь на определении зазора между зубчатым колесом и торцом проставочного кольца

Размерные цепи принято обозначать прописными буквами русского алфавита (А, Б, ...), если они образованы линейными размерами, и строчными буквами греческого алфавита, если их составляют угловые размеры ( $\beta$ ,  $\gamma$ ) (кроме букв  $\alpha$ ,  $\delta$ ,  $\xi$ ,  $\lambda$ ,  $\omega$ ).

Размеры, образующие размерную цепь, называют звеньями размерной цепи.

На схемах размерных цепей звенья условно обозначаются: линейные размеры — двусторонними стрелками, угловые размеры — односторонними стрелками с направлением острия к базе. Для обозначения звеньев размерных цепей используют те же буквы, что и для обозначения самих размерных цепей, с добавлением

соответствующих индексов.

В любой размерной цепи одно из звеньев является замыкающим, все остальные — составляющие звенья.

Замыкающим называют звено размерной цепи, являющееся исходным при постановке задачи или получающееся последним в результате ее решения.

В замыкающем звене заключен смысл решаемой задачи независимо от того, является задача прямой или обратной. Задача - обеспечить зазор между зубчатым колесом и торцом кольца (см. рис. 15). Поэтому зазор в этой задаче будет являться замыкающим звеном, поскольку именно он нас интересует.

В процессе проектирования, при разработке технологического процесса изготовления механизма все действия по обеспечению зазора будут исходить от его заданного значения. Однако свойства зазора, как замыкающего звена, сохраняются и тогда, когда он будет получен последним в размерной цепи в результате сборки механизма.

В обозначении замыкающее звено отличается от составляющих индексом «0».

Составляющим звеном называют звено размерной цепи, функционально связанное с замыкающим звеном.

Обозначается составляющее звено той же буквой, что и сама размерная цепь, с индексом, соответствующим порядковому номеру составляющего звена.

С точки зрения влияния на значение замыкающего звена составляющие звенья подразделяются на увеличивающие и уменьшающие.

Увеличивающим называют составляющее звено размер-

ной цепи, с увеличением которого замыкающее звено увеличивается (звено  $A_2$  рис.15).

**Уменьшающим** называют составляющее звено размерной цепи, с увеличением которого замыкающее звено уменьшается (звенья  $A_1$  и  $A_3$  рис. 15).

Обозначают увеличивающее звено стрелкой над буквой направленной вправо, уменьшающее звено — стрелкой, направленной влево.

В зависимости от характера решаемых задач размерные цепи подразделяют на

- конструкторские,
- технологические
- измерительные.

**Конструкторской** называют размерную цепь, определяющую расстояние или относительный поворот поверхностей или осей поверхностей в изделии.

Примером конструкторской размерной цепи может служить размерная цепь  $A$ , показанная на рис. 15.

**Технологической** называют размерную цепь, обеспечивающую требуемое расстояние или относительный поворот поверхностей изделия в процессе его изготовления.

Технологические размерные цепи возникают в процессе сборки машины и ее сборочных единиц и в процессе изготовления деталей. Технологические размерные цепи могут отображать связи между операциями (переходами) технологического процесса при получении того или иного размера, образование размера при выполнении операции (перехода) или роль отдельных этапов операции в обеспечении точности выдерживаемого размера.

Измерительной называют размерную цепь которая используется при простановке размеров.

Любая из перечисленных видов размерная цепь может быть основной и производной.

Основной называют размерную цепь, замыкающим звеном которой является размер, обеспечиваемый в соответствии с решением основной задачи.

Производной называют размерную цепь, замыкающим звеном, которой является одно из составляющих звеньев основной размерной цепи.

Производная размерная цепь раскрывает содержание составляющего звена основной размерной цепи.

Звеньями размерных цепей могут быть либо линейные, либо угловые размеры. В зависимости от этого размерную цепь называют соответственно либо линейной, либо угловой.

Звенья размерной цепи могут быть расположены в одной или нескольких параллельных плоскостях и в непараллельных плоскостях. В первом случае размерную цепь называют плоской, во втором — пространственной.

Размерные цепи могут быть связаны между собой.

Параллельно связанными называют размерные цепи, имеющие одно или несколько общих составляющих звеньев.

Последовательно связанными называют размерные цепи, из которых каждая последующая имеет одну общую базу с предыдущей.

Размерные цепи с комбинированной связью имеют между собой и параллельные, и последовательные связи.

### *Постановка задачи и выявление размерной цепи*

Наиболее сложным в использовании теории размерных цепей на практике является выявление размерной цепи в соответствии с поставленной задачей. Выявление любой размерной цепи начинается с нахождения ее замыкающего звена.

Замыкающее звено размерной цепи находят исходя из задачи, возникающей при конструировании изделия, его изготовлении или измерении. Поэтому вначале должна быть поставлена и четко сформулирована задача, решение которой необходимо для обеспечения соответствия конструкции изделия его служебному назначению, обеспечения требуемой точности изделия при изготовлении или оценке его точности при измерении.

При конструировании изделия переход от формулировки задачи к нахождению замыкающего звена заключается в выявлении такого линейного или углового размера, от значения которого полностью зависит решение поставленной задачи.

При изготовлении изделия замыкающим звеном размерной цепи является размер, точность которого должна быть обеспечена технологическим процессом.

При измерении замыкающим звеном является измеренный размер.

Каждая размерная цепь дает решение только одной задачи и может иметь одно замыкающее звено.

Допуск замыкающего звена устанавливают следующим образом:

- в конструкторских размерных цепях исходя из служебного назначения изделия или его части;

- в технологических размерных цепях в соответствии с допуском на расстояние или относительный поворот поверхностей детали (их осей) или деталей изделия, которые необходимо получить в результате осуществления технологического процесса изготовления детали или сборки изделия;
- в измерительных размерных цепях исходя из требуемой точности измерения.

*Выявление составляющих звеньев размерной цепи.*

Выявив замыкающее звено, можно приступить к нахождению составляющих звеньев размерной цепи. Составляющими звеньями конструкторских размерных цепей могут быть:

- расстояния (относительные повороты) между поверхностями (их осями) деталей, образующими замыкающее звено, и основными базами этих деталей;
- расстояния (относительные повороты) между поверхностями вспомогательных и основных баз деталей, непосредственно участвующих в решении поставленной задачи своими размерами.

Руководствуясь этим положением, для нахождения размерной цепи следует идти от поверхностей деталей (их осей), образующих замыкающее звено, к основным базам этих деталей, от них — к основным базам деталей, базирующих первые детали, вплоть до образования замкнутого контура. Несовпадения (зазоры, несоосности) основных и вспомогательных баз соединяемых деталей, если они возможны, учитываются отдельными звеньями. Таким образом, деталь может участвовать в размерной цепи лишь

одним своим размером.

Выявление технологических размерных цепей, отображающих связь операций при получении размера детали, рекомендуется начинать с последней операции, на которой получается выдерживаемый размер. При этом могут иметь место два варианта:

а) задача обеспечения точности размера решается в пределах последней операции (в тех случаях, когда в качестве одной из технологических баз используется поверхность, от которой задан размер). В этом случае точность выдерживаемого размера достигается с помощью размерной цепи технологической системы, используемой на этой операции;

б) выдерживаемый размер будет являться замыкающим звеном трехзвенной размерной цепи, в которой одним из составляющих звеньев является расстояние (поворот) между конечным положением режущего инструмента и технологической базой детали, а другим составляющим звеном — размер, полученный на одной из предшествующих операций.

Рассматривая последний как замыкающее звено размерной цепи, возникающей на предшествующей операции, могут иметь место либо вариант а), либо вариант б). Развитие размерных связей завершается операцией, на которой размер получается как замыкающее звено размерной цепи технологической системы.

*Методика построения плоской размерной цепи  
с параллельными звеньями*

Правильно построенный замкнутый контур должен содержать только такие размеры, величина и точность которых влияют

на формируемый в процессе проектирования, изготовления или измерения показатель точности машины (сборочной единицы). В этом и только в этом случае он позволяет получить правильные ответы на два интересующих вопроса:

1) какие детали (сборочные единицы) участвуют в формировании рассматриваемого показателя точности машины?,

2) каким или какими своими размерами они это делают?

Любые ошибки в построении размерной цепи делают модель процесса некорректной, конструкторские и технологические решения, принятые на основе анализа такой модели, снижают качество машины либо делают ее вообще неработоспособной. Исправление такого рода ошибок по результатам контроля уже изготовленных машин приводит к большим дополнительным затратам, значительному удлинению процесса технической подготовки производства новой машины.

Построение размерной цепи начинают с выявления исходного звена. Исходным звеном называют размер, содержащийся в формулировке поставленной задачи. Исходное звено может содержаться в формулировке задачи в явной или неявной форме.

Например, для токарного станка в технических условиях ставится задача: "Обеспечить совпадение осей конусных отверстий шпинделя и пиноли задней бабки. Допускаемая несоосность не более ... мм". Здесь исходное звено присутствует в явном виде, так как несоосность есть на что иное, как расстояние между этими осями.

К сожалению, в конструкторской документации нередко формулируются задачи, в которых в явной форме никаких размеров нет. Такие задачи представляют для технолога наибольшую

трудность, Например, сформулировано техническое условие: "Шестерня должна свободно без заеданий вращаться на оси". Без размерного представления технолог не в состоянии решить эту задачу при изготовлении машины. В этом случае технолог вынужден анализировать физический смысл задачи и выявлять размерные связи между деталями конструкции, которые нужно сформировать. Для решения рассматриваемой задачи необходимо сформировать в конструкции два размера: зазор  $A_0$  между отверстием шестерни и осью и осевой зазор  $B_0$  между торцами шестерни и проставочного кольца (рис. 16). Оба эти зазора в конструкторском чертеже обычно даже не изображены и могут быть представлены только мысленно, но они в реальной машине обязательно должны быть. Минимальная и максимальная их величина обуславливается многими причинами. Например, можно сказать, что минимальный зазор  $A_0$  зависит от разности линейной тепловой деформации материалов шестерни и оси, колебаний теплового режима работы конструкции, применяемой смазки и т.д.

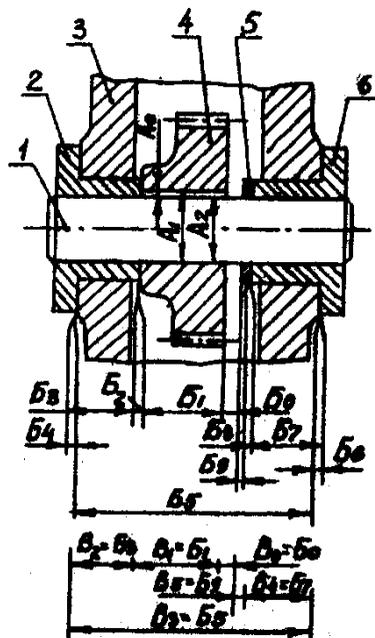


Рис. 16. Размерные цепи, обеспечивающие вращение шестерни на оси

Максимальная величина  $A_0$  скорее всего будет ограничиваться допустимым радиальным биением зубчатого венца шестерни, так как ясно, что с увеличением  $A_0$  это биение также растёт. К сожалению, конструктор сегодня не всегда располагает надёжными исходными данными, методиками, зависимостями и уравнениями для обоснования допусковых величин типа  $A_0$ ,  $B_0$  и других подобных.

Выявление первого составляющего звена. Исходное звено всегда по физическому смыслу представляет собой показатель точности машины (сборочной единицы), т.е. расстояние (относительный поворот) между поверхностями ее различных деталей.

Приступая к выявлению составляющих звеньев замкнутого контура размеров, можно начинать из любого конца исходного звена, так как в любом случае мы окажемся на поверхности одной из деталей, между которыми задано исходное звено. Например, на рис. 16 при построении цепи Б начинаем с левого конца исходного звена  $B_0$ , т.е. с торцевой плоскости шестерни 4.

Правило 1. Первое составляющее звено размерной цепи представляет собой размер детали, описывающий в направлении исходного звена положение поверхности (или ее элемента), соответствующий концу исходного звена, относительно основной базы этой детали.

Таким образом, построение первого составляющего звена требует выявления основной базы детали в координатном направлении исходного звена. В рассматриваемом примере основной базой шестерни в направлении размера  $B_0$  (вдоль оси) является торец ступицы, следовательно, первым составляющих звеном размерной цепи будет размер шестерни  $B_1$ .

#### Выявление второго составляющего звена.

Правило 2. Второе составляющее звено представляет собой размер, описывающий в направлении исходного звена переход с основной базы первой детали на соответствующую вспомогательную базу следующей детали.

Согласно теории базирования такой переход осуществляется размером установки, номинальное значение которого чаще всего равно нулю, но не равна нулю его погрешность - погрешность установки  $\omega_y$ . С точки зрения формирования погрешности показателя точности машины (исходного звена), включение тако-

го размера в размерную цепь оправдано.

В примере на рис. 16 второе звено  $B_2$  описывает переход с торца шестерни (основная база первой детали) на торец втулки 2 (соответствующая вспомогательная база). Этот размер на схеме показан условно.

Выявление третьего составляющего звена. Задача этого шага - определить в конструкции в направлении исходного звена положение вспомогательной базы, которая соответствует концу предыдущего звена размерной цепи. В примере на рис. 15 речь идет о правом торце втулки 2. Очевидно, что положение этой поверхности в конструкции после установки туда несущей ее детали полностью определяется внутридетальным размером относительно основной базы. Таким образом, для построения третьего звена необходимо выявить основную базу второй детали в направлении исходного звена. В примере основной базой втулки 2 служит кольцевая плоскость ее бурта, следовательно, третье звено  $B_3$  - размер между двумя торцами втулки 2, служащими ее основной и вспомогательной базами.

Правило 3. Третье составляющее звено представляет собой размер второй детали в направлении исходного звена между ее основной базой и вспомогательной базой, выявленной при построении предыдущего звена.

Обращает на себя внимание принципиальная общность с точки зрения физического смысла первого и третьего звеньев: внутридетальные размеры, описывающие положение относительно основной базы детали других поверхностей, выполняющих роль вспомогательной базы, или ограничивающих исходное звено.

Выявление составляющих звеньев  $4 - (i-1)$  Следующие звенья размерной цепи выявляются на основе правил 2 и 3 и описывают повторяющиеся процессы установки каждой следующей детали и внутривидетальное расположение участвующих в этих процессах их поверхностей. Количество этих звеньев может быть любое и определяется сложностью конструкции машины.

В результате этой работы достигается еще один принципиально отличающийся от предыдущих шаг, при выявлении которого определяется некоторое  $i$ -е звено.

Выявление  $i$ -го звена. Это звено представляет собой внутривидетальный размер базовой детали машины (сборочной единицы). Под базовой деталью в данном случае понимают такую, которая определяет взаимное расположение всех других. Обычно - это корпусная деталь. Например, в конструкции на рис. 2 такой базовой деталью является корпус 3, который различными своими вспомогательными базами определяет взаимное положение всех остальных, потенциально участвующих в решении поставленной задачи. При этом оказывается безразличным положение самой базовой детали, так как его изменения не сказываются на взаимном расположении установленных на нее других деталей. Так, положение корпуса 3 в машине не отражается на зазорах  $A_0$  или  $B_0$ . Поэтому при достижении вспомогательной базы базовой детали при построении размерной цепи становится бесполезным правило 3, более того, формальное следование ему не позволит замкнуть строящийся контур размеров. В связи с этим существует правило 4

Правило 4:  $i$ -е звено представляет собой внутривидетальный размер базовой детали между двумя ее вспомогательными база-

ми, ориентирующими две разные детали в направлении исходного звена.

В примере на рис. 16 таким звеном является  $B_5$  - размер между торцами бобышек корпуса, служащих вспомогательными базами для втулок 2 и 6. Первую такую вспомогательную базу находят в результате выявления ( $i-1$ )-го звена. На рис. 2 такое ( $i-1$ )-е звено - это  $B_3$ . Вторую вспомогательную базу при наличии достаточного опыта такой работы находят обычно при визуальном анализе исследуемой конструкции. В случае затруднений и для проверки результата визуального поиска можно применить прием построения размерной цепи, начиная с противоположного конца исходного звена. В этом случае, пользуясь правилами 1, 2, 3, обязательно достигают второй вспомогательной базы базовой детали. Так, в примере на рис. 16 можно начать построение цепи Б из правого конца исходного звена  $B_0$  и тогда будут выявлены по правилам 1, 2 и 3 звенья  $B_9$ ,  $B_8$ ,  $B_7$ ,  $B_6$  после этого появится торец правой бобышки корпуса в качестве вспомогательной базы для втулки 6.

Выявление остальных звеньев ( $i + 1$ ) -  $m$ . Эти звенья могут быть выявлены двумя путями. Первый уже только что описан - построением размерной цепи, начиная с противоположного конца исходного звена. Второй заключается в применении тех же правил 3, 2 и 1, но в обратном направлении, т.е. осуществляя переход со вспомогательных баз предшествующих деталей на основные базы последующих. Например, на рис. 2 размером  $B_6$  переходят со вспомогательной базы корпуса на основную базу втулки 6 (в противоположность размеру  $B_4$ ), размером  $B_8$  - со вспомогательной базы втулки 6 на основную кольца 5 (в противополож-

ность размеру  $B_2$ ). Внутридетальные же размеры всегда определяются по правилу 3, и только последнее звено  $m$  по правилу 1.

Замыкание контура. Замкнуть контур размеров - значит вернуться в исходную точку. Начав из левого конца исходного звена, нужно в конце построения в него же вернуться. Для этого после построения звена  $m$  нужно "пройти" по исходному звену и этим действием цепь "замкнуть". Поэтому исходное звено в конце построения размерной цепи называют замыкающим. Так как исходное и замыкающее звенья - это один и тот же размер, в практике, а иногда и в специальной литературе используют только термин "замыкающее звено", хотя это упрощение смазывает смысл и последовательность построения размерной цепи.

В практике решения инженерных задач на базе теории размерных цепей используют один прием, который существенно уменьшает число звеньев в цепи. Этот прием связан со звеньями типа  $B_2$ ,  $B_4$  и т.д., т.е. размерами, описывающими переход с основной на вспомогательную базу (размерами установки). Прием заключается в том, что если в схеме базирования нет неопределенности, то размер перехода в цепь не включают. Сравнение величин элементарных погрешностей, составляющих в сумме погрешность установки, показывает, что погрешность от неопределенности базирования  $\omega_{НБ}$ , как правило, на порядок больше всех остальных и достигает порядка полей допусков внутридетальных размеров, включаемых в размерную цепь.

Поэтому, если  $\omega_{НБ} = 0$ , то при незначительном и допустимом для большинства практических задач снижении точности расчетов удастся значительно "укоротить" размерные цепи и уп-

ростить расчеты.

Например, на рис. 17 схемы базирования всех деталей не содержат неопределенности, поэтому вместо цепи Б в практике достаточную точность анализа дает цепь В с исходным звеном  $B_0 = B_0$ , в которой исключены звенья  $B_2, B_4, B_6, B_8$ .

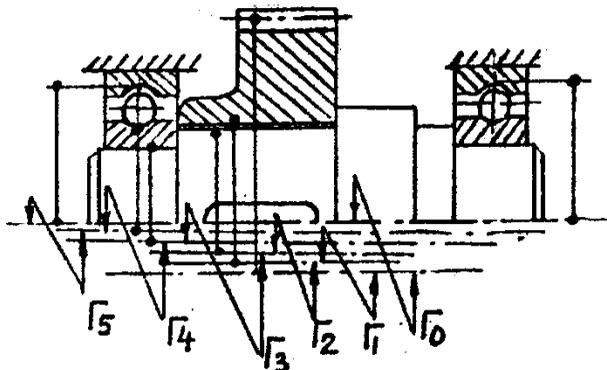


Рис. 17 Размерная цепь радиального биения зубчатого венца шестерни

Если же в схемах базирования деталей есть неопределенность, прием применять нельзя. Например, на рис.17 показана размерная цепь Г, описывающая формирование радиального биения зубчатого венца шестерни относительно его рабочей оси вращения. Под рабочей осью вращения понимают ось, вокруг которой вращается зубчатый венец. Такой осью является общая ось беговых дорожек наружных колец шарикоподшипников. В размерную цепь Г составляющими звеньями входят несоосность  $G_2$  базового отверстия шестерни и шейки вала и несоосность  $G_5$  окружностей расположения центров шариков и беговых дорожек наружных колец. В соединении шестерня - вал неопределенность

базирования введена в технологических целях для упрощения сборки, в соединении шарики - беговая дорожка неопределенность обусловлена необходимостью обеспечить вращение вала. Исключать размеры  $G_2$  и  $G_5$  из размерной цепи нельзя, так как смещения в пределах зазоров сопоставимы, а могут быть и больше допусков внутридетальных размеров  $G_1, G_3, G_4$ .

### *Задачи, решаемые на базе теории размерных цепей*

Все задачи размерного анализа конструкций и технологических процессов, решаемых на базе уравнений размерной цепи, сводятся к двум типам: прямая и обратная.

**Прямая задача** состоит в том, чтобы по известным параметрам  $A_0, TA_0, E_{C_0}$  замыкающего звена рассчитать и назначить соответствующие параметры  $A_i, TA_i, E_{C_i}$  всех составляющих звеньев. Эту задачу называют еще проектной, так как ее обычно решают при проектировании машины или технологического процесса. Конструктор машины, в этом случае, исходя из требуемого показателя точности машины, представляемого как замыкающее звено размерной цепи, рассчитывает и назначает обоснованные допуски и их расположение для всех деталей, входящих своими размерами в эту размерную цепь. Технолог при разработке технологических процессов в результате расчета соответствующей размерной цепи, в которой замыкающим звеном является получаемый на детали (в СЕ) размер, выбирает или назначает требуемую точность технологического оборудования, оснастки, инструмента, средств операционного контроля.

Контролер при разработке схем измерения показателей

точности в результате решения прямой задачи выбирает или назначает требуемую точность измерительных инструментов и устройств.

Особенностью математического решения прямой задачи является его многовариантность. Действительно, для каждого из составляющих звеньев можно назначать множество комбинаций величин  $A_i$ ,  $TA_i$ ,  $E_c A_i$  удовлетворяющим уравнениям

$$A_0 = \sum_{i=1}^m \zeta_i A_i \quad (13)$$

$$TA_0 = \sum_{i=1}^m |\zeta_i| TA_i \quad (14)$$

$$E_{Co} = \sum_{i=1}^m \zeta_i E_c TA_i \quad (15)$$

где  $\zeta_i$  - передаточное отношение звена.

При выборе из этого множества решений подходящего для решаемой задачи приходится использовать дополнительные критерии оценки. Такими критериями являются:

Физическая возможность получения назначаемой точности  $TA_i$  в условиях реального производства;

Затраты на достижение назначаемой точности для всех составляющих звеньях.

Оптимальным считают такое решение, которое обеспечивает минимальные затраты в производстве на изготовление деталей с задаваемой по этому решению точностью.

Таким образом, прямая задача в размерной цепи всегда

представляет собой задачу технико-экономическую.

**Обратная задача** состоит в том, чтобы по известным параметрам составляющих звеньев  $A_i$ ,  $TA_i$ ,  $E_{CA_i}$  определить параметры замыкающего звена  $A_0$ ,  $TA_0$ ,  $E_{CA_0}$ . Эту задачу называют еще проверочной, так как конструктор с ее помощью проверяет правильность назначенных в ходе решения прямой задачи допусков на составляющие звенья. Технолог решением обратной задачи в технологической размерной цепи проверяет возможность получения на детали заданной точности  $TA_0$  при использовании уже имеющихся в цехе оборудования, оснастки и инструмента.

*Пути повышения точности замыкающего звена*

Поскольку повышение точности машины сводится к уменьшению поля рассеяния замыкающего звена соответствующей размерной цепи, то возможные пути этого повышения можно выяснить анализируя уравнения:

$$TA_0 = \sum_{i=1}^m |\zeta_i| TA_i$$

$$\omega A_0 = \sum_{i=1}^m |\zeta_i| \omega A_i$$

Таких возможных путей три. Уменьшение полей рассеяния  $\omega A_i$  составляющих звеньев. Другими словами - повысить точность машины можно, повысив соответственно точность размеров составляющих ее деталей. Этот очевидный путь долгое время был единственным и стимулировал разработку новых финишных методов обработки, совершенствование оборудования, инструмента,

оптимизацию рабочих режимов с целью удешевления процессов достижения высокой точности при обработке. Однако этот путь имеет свои пределы: достижимая точность имеющихся в арсенале технолога методов обработки либо экономическая целесообразность той или иной достигнутой точности. Уменьшение количества звеньев в размерной цепи. Этот путь получил название также “принципа наикратчайшего пути”. Этот принцип нацеливает разработчика на создание конструкции или технологической операции, в которых требуемый размер формировался бы в наикратчайшей размерной цепи. Уменьшение передаточных отношений  $\zeta_i$  составляющих звеньев.

### **3.3. Методы достижения точности замыкающего звена**

В различных производственных условиях прямая задача размерного анализа решается по-разному. Для того, чтобы найти оптимальное решение разработаны и применяются на практике шесть методов достижения точности замыкающего звена:

- метод полной взаимозаменяемости;
- метод неполной взаимозаменяемости;
- метод групповой взаимозаменяемости;
- метод пригонки;
- метод регулирования;
- метод подбора составляющих звеньев.

Эти методы различаются объемом и характером работ, ко-

торые необходимо выполнять как при проектировании машины и ее деталей, так и в технологических процессах сборки и механической обработки.

### *Метод полной взаимозаменяемости*

Сущность метода заключается в том, что требуемая точность замыкающего звена размерной цепи достигается путем включения в нее при изготовлении машины (или замене в ней при ремонте) составляющих звеньев без выбора подбора или изменения их величины.

При использовании этого метода требуемая точность размерных связей в машине обеспечивается на сборке при простом соединении любого набора входящих в нее деталей, и достижение этой точности не требует от рабочего-сборщика каких либо особых действий, кроме действий по осуществлению различных соединений (подвижных или неподвижных, разъемных или неразъемных).

Наиболее распространенным и простейшим примером этого метода могут служить крепежные резьбовые детали. Так, любая гайка М10 независимо от места и времени ее изготовления свинчивается с любым болтом М10. Любая электролампа накаливания, купленная в магазине, гарантированно ввинчивается в электропатрон без выбора или каких-либо изменений размеров резьбового цоколя. В этих примерах свинчиваемость обеспечивается гарантированным радиальным зазором между витками резьбы. Этот зазор предусматривается при проектировании деталей соединения путем задания соответствующих размеров и допусков и все-

гда появляется при свинчивании изготовленных по этим размерам двух любых деталей.

Другим наглядным примером использования метода полной взаимозаменяемости при получении размера на детали в ходе обработки может служить операция сверления отверстий в партии деталей. Смена затупившегося или сломанного сверла производится без какого либо его выбора или подбора и при этом отверстия у всех обработанных деталей получаются в пределах заданного допуска.

Метод обладает рядом достоинств, поэтому его используют в первую очередь. К таким достоинствам относятся:

Наибольшая простота достижения заданной точности размерной связи, так как построение размерной цепи сводится к простому соединению всех деталей, несущих составляющие звенья.

Простота нормирования во времени процессов, при помощи которых достигается требуемая точность замыкающего звена.

Относительная простота механизации и автоматизации технологических процессов, в которых достигается требуемая точность замыкающего звена.

Возможность использования рабочих низкой квалификации и обусловленные этим низкие затраты на живой труд.

К сожалению, метод имеет достаточно узкую область применения, ограниченную причинами технологического и экономического характера. Эти ограничения вытекают из необходимости соблюдения двух условий применимости метода полной взаимозаменяемости: конструкторского и технологического.

### *Конструкторское условие*

Давайте вспомним, что величины номиналов, полей допусков и координат их середин для всех составляющих звеньев размерной цепи должны назначаться из условия обязательного соответствия уравнениям, используемым в анализе конструкторских размерных цепей:

$$A_0 = \sum_{i=1}^m \zeta_i A_i \quad (17)$$

$$TA_0 = \sum_{i=1}^m |\zeta_i| TA_i \quad (18)$$

$$E_{Co} = \sum_{i=1}^m \zeta_i E_c TA_i \quad (19)$$

Для наиболее распространенного случая плоской размерной цепи с параллельными звеньями уравнение (18) приобретает вид:

$$TA_0 = \sum_{i=1}^m TA_i \quad (20)$$

При определении возможности применения полной взаимозаменяемости обычно из уравнения (20) определяют средний допуск составляющего звена:

$$TA_{cp} = \frac{TA_0}{m} \quad (21)$$

Если эта средняя величина допуска окажется достижимой и экономически приемлемой для данных производственных условий, то допуски составляющих звеньев корректируют, уменьшая или увеличивая по сравнению с  $TA_{ср}$  допуски  $TA_i$  каждого звена в зависимости от трудностей и экономичности получения на соответствующих деталях требуемой точности. Но после всех корректировок назначенные допуски составляющих звеньев обязательно должны удовлетворять уравнению (21) .

После этого устанавливают или рассчитывают координаты середин  $E_cTA_i$  для всех составляющих звеньев, удовлетворяющие уравнению (19). Обычно на  $(m-1)$  звеньев координаты  $E_cTA_i$  назначают, исходя из имеющихся нормативных документов (нормалей, стандартов и т.п.) на отдельные нормативные входящие в размерную цепь детали либо из удобства получения их при обработке деталей, а на одно звено - рассчитывают, исходя из уравнения (19).

Правильность назначения всех  $TA_i$  и  $E_cTA_i$  проверяют рассчитывая верхнее и нижнее отклонения замыкающего звена по формулам:

$$E_sA_0 = E_cTA_0 + \frac{1}{2}TA_0 = \sum_{i=1}^m \zeta_i E_cTA_i + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^m TA_i \quad (22)$$

$$E_iA_0 = E_cTA_0 - \frac{1}{2}TA_0 = \sum_{i=1}^m \zeta_i E_cTA_i - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^m TA_i \quad (23)$$

Допуски  $TA_i$  и координаты их середин  $E_cTA_i$  назначены верно, если значения  $E_sA_0$  и  $E_iA_0$  рассчитанные по формулам (22) и (23), совпадают с заданными в условиях задачи. Эта проверка

предельных отклонений замыкающего звена по формулам (22) и (23) известна также под названием "расчет на максимум-минимум".

Рассмотрим пример.

В размерной цепи на рис.18 необходимо обеспечить зазор  $B_0$  в пределах  $0,2 \pm 0,15$  мм, т.е. поле допуска  $TB_0 = 0,3$  и  $E_cTB_0 = 0$ .

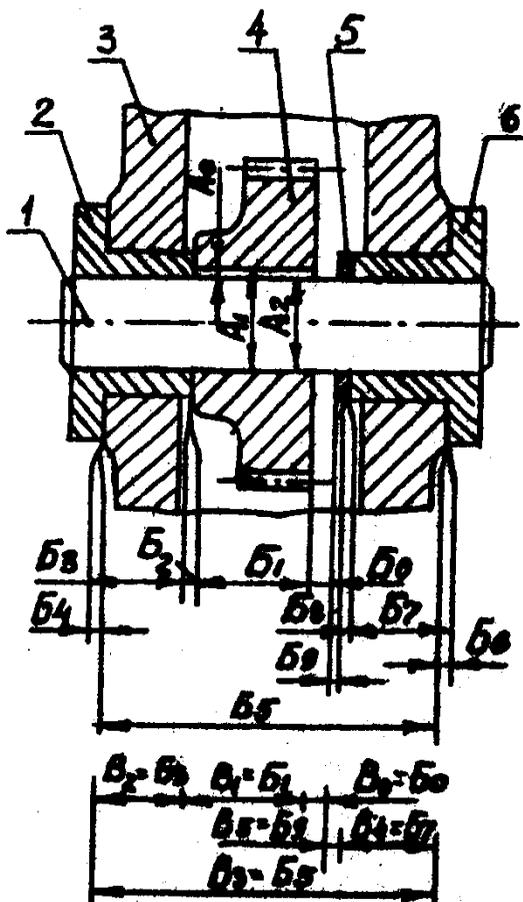


Рис. 18. Пример расчета размерной цепи (он же в лекции 6)  
 В цепи в  $m=5$  составляющих звеньев. Тогда

$$TB_{cp} = 0,3/5 = 0,06 \text{ мм.}$$

Все размеры, входящие в размерную цепь, возможно получить в механообработке с такой точностью. Однако, на проставочном кольце - звено **B<sub>5</sub>** - получить такую точность, и даже более высокую, значительно легче, чем при обработке корпуса - звено **B<sub>3</sub>**. Поэтому целесообразно допуск **T<sub>B<sub>5</sub></sub>** уменьшить по отношению к  $T_{B_{cp}}$  и на эту величину увеличить **T<sub>B<sub>3</sub></sub>**. Размеры втулок (звенья **B<sub>2</sub>** и **B<sub>4</sub>**) и шестерни (звено **B<sub>1</sub>**) также без особых трудностей можно получить в механообработке с несколько более узким допусками. Поэтому назначаем:

$$TB_1 = 0,04 \text{ мм, } TB_2 = TB_4 = 0,05 \text{ мм, } TB_3 = 0,13 \text{ мм, } TB_5 = 0,03 \text{ мм.}$$

$$\text{Тогда } TB_0 = 0,04 + 0,05 + 0,13 + 0,05 + 0,03 = 0,3 \text{ мм.}$$

Учитывая рекомендации стандартов, условия получения размеров на каждой детали, назначаем координаты  $E_c TA$  следующим образом:

$$E_c TB_1 = -0,02, \quad E_c TB_2 = E_c TB_4 = 0, \quad E_c TB_3 = 0$$

Тогда уравнение (3) будет иметь вид

$$0 = (-1)(-0,02) + (-1)(0) + (+1)(0) + (-1)(0) + (-1) E_c TB_5, \text{ откуда}$$

$$E_c TB_5 = +0,02$$

Проверка:

$$E_s B_0 = (-1)(-0,02) + (-1)0 + (+1)0 + (-1)0 + (+1)(+0,02) + (0,04 + 0,05 + 0,13 + 0,05 + 0,03) = 0,15 \text{ мм}$$

$$E_i B_0 = 0 - 0,15 = -0,15 \text{ что соответствует условию задачи.}$$

Описанная методика назначения допусков составляющих звеньев базируется на принципе равных влияний, согласно которому все звенья в равной степени влияют на образование погрешности замыкающего звена, и поэтому их допуски могут быть равны между собой и могут соответствовать  $TA_{cp}$ . Этот принцип с

достаточной степенью точности может быть применен для расчетов в размерных цепях, где звенья по номинальным значениям не очень сильно разнятся между собой - относятся к одному интервалу, либо к двум соседним. В случае же, если интервалы размеров находятся далеко друг от друга, используют принцип равного качества точности, согласно которому все звенья размерной цепи должны иметь равный квалитет точности, тогда размеры, сильно отличающиеся по номиналу, будут иметь разные поля допусков. Это позволяет организовать изготовление деталей по размерам - звеньям цепи на одном уровне точности.

В практике же обычно поступают следующим образом. Вначале выделяют звенья - размеры стандартных деталей или СЕ и назначают их допуски в соответствии со стандартом. Затем определяют часть поля допуска замыкающего звена, которая остается на компенсацию погрешностей остальных звеньев цепи:

$$TA'_0 = TA_0 - \sum_{i=1}^K TA_i \quad (24)$$

где  $K$  - число звеньев со стандартизированными допусками. Допуски на оставшиеся звенья определяют по изложенным выше методикам либо подбором исходя из условия, что их сумма не должна превышать допуск  $TA'_0$ , определяемый по формуле (24).

#### *Технологическое условие*

При изготовлении деталей погрешности всех составляющих звеньев размерной цепи не должны выходить за пределы, назначенные конструктором в соответствии с вышеизложенной методикой. Это означает, что должны соблюдаться неравенства:

$$EsA_0 \leq \sum_{i=1}^m \xi_i EcA_i + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^m \omega A_i \quad (25)$$

$$EiA_0 \geq \sum_{i=1}^m \xi_i EcA_i - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^m \omega A_i \quad (26)$$

Соблюдение условия (26) значительно более сложно, чем (25), так как для всех деталей нужно разработать или выбрать, а затем и реализовать такие технологические процессы, в которых обязательно выполнялось бы условие:

$$\omega A_i \leq TA_i.$$

Границы применения метода полной взаимозаменяемости определяет обычно экономика производства. Известно, что с повышением требуемой точности изготовления растут и затраты на достижение этой точности. Давайте разберем график зависимости себестоимости изготовления вала от требуемой точности его по диаметру (рис. 19).

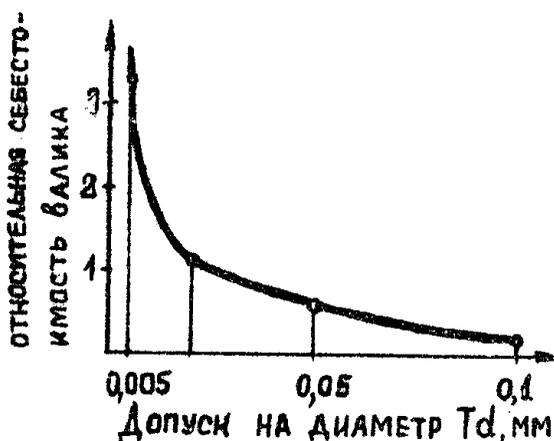


Рис. 19 График зависимости относительной себестоимости

изготовления валика от заданной точности.

Как видно из графика, с уменьшением допуска на диаметр относительная себестоимость валика растет в соответствии с некоторой показательной функцией. Это объясняется тем, что по мере повышения точности приходится менять технологический процесс, вводить дополнительные операции, выполняемые, как правило, на более дорогом и менее производительном оборудовании.

Так, обработка валиков диаметром  $D=15\text{мм}$  допуском  $T_D=0,1$  очень проста: достаточно из калиброванного прутка отрезать заготовку требуемой длины.

При допуске  $T_D=0,05$  мм валик придется еще обточить на токарном станке. При допуске  $T_D=0,02$  мм после обтачивания валик придется шлифовать. При допуске  $T_D=0,005$  мм придется использовать еще менее производительную операции притирки после точения и шлифования, и поэтому себестоимость возрастает особенно резко.

В то же время из формулы (4) видно, что средний допуск составляющего звена быстро уменьшается с увеличением количества составляющих звеньев в размерной цепи, и, в конце концов, может оказаться, что его невозможно обеспечить на данном этапе развития техники и технологии.

Таким образом, из изложенного можно сделать вывод о том, что метод полной взаимозаменяемости возможно и экономически целесообразно применять в так называемых малозвенных размерных цепях (т.е. с небольшим количеством составляющих звеньев). Большое значение имеет также количество изготавливаемых изделий, так как в массовом производстве возрастают воз-

возможности эффективного применения более точного, производительного, но и более дорогого оборудования и специальной оснастки. Массовый характер производства несколько расширяет целесообразную область применения полной взаимозаменяемости, но не снимает в принципе ни техническую, ни экономическую границы этой области.

### *Метод неполной взаимозаменяемости*

Сущность метода заключается в том, что требуемая точность замыкающего звена достигается не во всех изделиях, а у заранее оговоренной их части при включении в размерную цепь или замене в ней всех составлявших звеньев без выбора, подбора или изменения их величины.

Идея метода заключается в том, чтобы расширить границы применения достоинств полной взаимозаменяемости при сборке за счет допущения при изготовлении у некоторой части изделий показателя точности замыкающего звена за пределами заданного допуска. Это допущение предполагает определенное расширение поля рассеяния замыкающего звена  $\omega A_0$  (другими словами, назначение нового производственного допуска на замыкающее звено  $TA'_0 \succ TA_0$ , более широкого, чем заданный конструктором). Это расширение поля рассеяния (допуска) замыкающего звена конечно же позволит расширить и производственные допуски составляющих звеньев  $TA'_i \succ TA_i$  по сравнению с требуемыми для полной взаимозаменяемости, а это означает снижение затрат на их достижение при изготовлении составляющих

деталей. Появление на сборке изделий за пределами установленного конструктором допуска потребует дополнительных затрат, во-первых, на их отбраковку, так как для этого придется организовать 100%-ный контроль всех изделий, и во-вторых, на доведение каким-либо способом этих отбракованных изделий до требуемой точности.

Допускаемое количество изделий за пределами конструкторского допуска, а следовательно, и степень расширения производственных допусков и  $TA'_i$  ограничиваются только экономическим условием: дополнительные затраты на отбраковку и "исправление" этих изделий не должны превышать экономии, полученной при механообработке за счет снижения затрат на изготовление менее точных деталей и на сборке за счет достоинств полной взаимозаменяемости.

Таким образом, для организации неполной взаимозаменяемости необходимо, задавшись (или рассчитав из экономических соображений) некоторой долей получаемых на сборке за пределами заданного конструктором допуска замыкающего звена  $TA_0$ , определить, в какой степени может быть расширен производственный допуск  $TA'_i$ , каждого из составляющих звеньев. Эта задача вносит своеобразие в способ решения уравнения полей допусков размерной цепи. Теоретическую базу этих расчетов составляет вероятностное описание результата технологического процесса. Действительно, фактические размеры в партии изготовленных деталей получают рассеяние, количественно характеризуемое набором показателей. Для всех законов распределения, кроме закона равной вероятности, характерным является тот

факт, что средние и близкие к ним размеры в партии деталей встречаются гораздо чаще, чем их крайние значения. При сборке же партии изделий из таких деталей случаи сочетания в одном изделии одноименных (например, верхних) отклонений у всех звеньев размерной цепи, встречается редко, и частота таких случаев резко убывает с увеличением количества звеньев  $m$  в размерной цепи.

Изложенное можно наглядно представить на схеме, показанной на рис. 3. Для большей иллюстративности на схеме принято, что  $TA_1 = TA_2$  и оба звена имеют нормальное распределение по закону Гаусса.

Из теории вероятностей известно, что закон распределения суммы таких случайных величин, т.е. замыкающего звена  $A_0$  в нашем примере, также будет Гауссовым со среднеквадратичным отклонением

$$\sigma A = \sqrt{\sigma^2 A_1 + \sigma^2 A_2} . \quad (27)$$

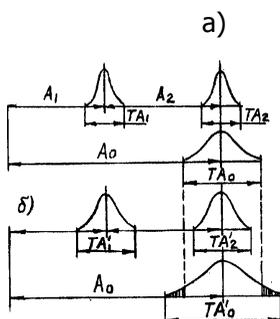


Рис. 20 Сравнительная схема достижения требуемой точности методами полной и неполной взаимозаменяемости в трехзвенной размерной цепи

В случае полной взаимозаменяемости (рис. 20а.)

$$TA_1 = TA_2 = \frac{1}{2} TA_0 \quad (28)$$

В случае же неполной взаимозаменяемости (рис.20,б)

$$TA_1' = TA_2' = \frac{1}{2} TA_0' > \frac{1}{2} TA_0 \quad (29)$$

При полной взаимозаменяемости размеры  $A_0$  всех изделий попадают в поле допуска  $TA_0$ , в то время как при неполной взаимозаменяемости появляются изделия за пределами допуски  $TA_0$ , и доля этих изделий в партии пропорциональна заштрихованной части площади под кривой распределения. Из схемы наглядно видно, что достаточно существенное увеличение производственных допусков составляющих звеньев  $TA_1$  и  $TA_2$  по сравнению с  $TA_1'$  и  $TA_2'$  приводит к появлению относительно небольшого числа собранных изделий за пределами допуска  $TA_0$ .

Для установления количественных связей между расширенными допусками составляющих звеньев и числом выбракованных изделий воспользуемся формулой для расчета среднеквадратичного отклонения замыкающего звена:

$$\sigma_0^2 = \sum_{i=1}^m \sigma_i^2 \quad (30)$$

Введем коэффициент риска  $t = \frac{x}{\sigma}$  где  $x$  - некоторая ве-

личина отклонения размера от его среднего значения в партии (рис. 21). Этот коэффициент характеризует долю изделий, имеющих отклонение за пределами  $\pm x$ .

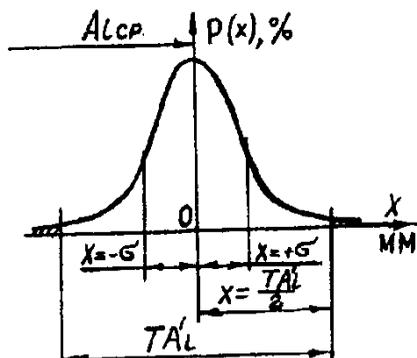


Рис. 21. Кривая нормального распределения на расширенном допуске  $i$ -го составляющего звена

При  $x_i = \frac{TA'_i}{2}$  коэффициент риска будет  $t_i = \frac{TA'_i}{2\sigma_i}$  откуда

$\sigma_i = \frac{TA'_i}{2t_i}$ . Заштрихованная площадь под кривой рассеяния, на

рис. 21 пропорциональна количеству изделий с отклонениями в этих областях.

Подставив эти выражения в формулу расчета среднеквадратичного отклонения замыкающего звена ( $\sigma_0^2 = \sum_{i=1}^m \sigma_i^2$ ), полу-

чим:

$$\frac{TA_0^2}{4t_0^2} = \sum_{i=1}^m \frac{(TA'_i)^2}{4t_i^2} \text{ или}$$

$$\frac{TA_0^2}{t_0^2} = \sum_{i=1}^m \frac{(TA'_i)^2}{t_i^2} \quad (31)$$

Отношение  $\frac{1}{t_i^2} = \lambda'_i$  представляет собой численный коэффициент, характеризующий закон распределения размеров в партии изделий. Так, для закона нормального распределения  $\lambda'_i = \frac{1}{9}$ ; для закона Симпсона  $\lambda'_i = \frac{1}{6}$ ; для закона равной вероятности  $\lambda'_i = \frac{1}{3}$ .

$$\text{тогда } \frac{TA_0^2}{t_0^2} = \sum_{i=1}^m \lambda'_i (TA'_i)^2 \quad (32)$$

В этой формуле  $t_0$  - коэффициент риска на замыкающем звене, характеризует процент (вероятность) изделий за пределами установленного допуска  $TA_0$ . Задавшись процентом изделий, которые выйдут за пределы допуска, по таблицам интеграла Лапласа находят соответствующее значение коэффициента риска  $t_0$

**Таблица 3**

Процент риска P	32	10	4,5	1,0	0,27	0,1	0,01
Коэффициент риска t	1.00	1.65	2.00	2.57	3.00	3.29	3.89

Далее рассчитывается средний допуск составляющего звена

$$TA'_{cp} = \frac{TA_0}{t_0 \sqrt{\lambda'_i \cdot m}} \quad (33)$$

Величину  $\lambda'_{cp}$  рассчитывают, выбирая закон рассеяния для описания распределения каждого составляющего звена и соот-

ветствующее ему значение  $\lambda'_i$ .

Ввиду принятых допущений формула (32) является приближенной, причем степень приближения возрастает с увеличением числа звеньев  $m$  и с приближением законов распределения составляющих звеньев к закону нормального распределения Гаусса. С достаточной для практики точностью этой формулой можно пользоваться:

- если составляющие звенья распределены по закону Гаусса - при  $m \geq 3$ ,
- если составляющие звенья распределены по закону, близкому к закону треугольника - при  $m \geq 4$ ,
- если составляющие звенья распределены по закону равной вероятности – при  $m \geq 6$ .

Степень расширения допусков составляющих звеньев по сравнению с полной взаимозаменяемостью можно оценить отношением

$$R = \frac{TA'_{cp}}{TA_{cp}} \quad (34)$$

Подставив в (8) значения  $TA_{cp}'$  и  $TA_{cp}$  из выражений (33) и (34), получим

$$R = \frac{1}{t_0} \sqrt{\frac{m}{\lambda'_{cp}}} \quad (35)$$

**Пример:** В размерной цепи с  $m = 6$  требуется обеспечить  $TA_0 = 0.3$  мм. Риск получения негодных изделий оценивается в

0.27%. Этому риску соответствует  $t_0 = 3$ , тогда  $\lambda'_{cp} = \frac{1}{3}$  (все звенья распределены по закону равной вероятности (индивидуальное производство))

$$R = \frac{1}{3} \sqrt{\frac{6 \cdot 3}{1}} = 1.41$$

при  $\lambda'_{cp} = \frac{1}{6}$  (серийное производство, все звенья распре-

делены по закону Симпсона)

$$R = \frac{1}{3} \sqrt{\frac{6 \cdot 6}{1}} = 2$$

при  $\lambda'_{cp} = \frac{1}{9}$  (крупносерийное и массовое производство,

все звенья распределены по закону Гаусса)

$$R = \frac{1}{3} \sqrt{\frac{6 \cdot 9}{1}} = 2.55.$$

Это означает, что если при полной взаимозаменяемости в этой цепи средний допуск составляющего звена должен быть

$TA_{cp} = \frac{0.3}{6} = 0.05$  мм, то при неполной взаимозаменяемости с

риском получения 0.27% негодных изделий этот средний допуск в условиях серийного производства может быть расширен до 0.1 мм, а в массовом – примерно до 0.13 мм.

Дальнейшие действия при назначении допусков  $TA_i'$  и координат их середин выполняются также, как и при полной взаимо-

заменяемости. Технологическое условие реализации метода такое же, как и для полной взаимозаменяемости, т.е. должны быть разработаны и реализованы такие технологические процессы изготовления составляющих деталей, для которых выполняется условие  $\omega A'_i \leq TA'_i$ .

Координаты средин полей рассеяния  $Ec\omega A'_i$  должны гарантировать на сборке получение предельных отклонений на замыкающем звене в соответствии с уравнениями:

$$EsA'_0 = \sum_{i=1}^m \xi_i Ec\omega A'_i + \frac{1}{2} t_0 \sqrt{\sum_{i=1}^m \lambda'_i (\omega A'_i)^2} \quad (36)$$

$$EiA'_0 = \sum_{i=1}^m \xi_i Ec\omega A'_i - \frac{1}{2} t_0 \sqrt{\sum_{i=1}^m \lambda'_i (\omega A'_i)^2} \quad (37)$$

и должны соответствовать назначенным конструктором:

$$EsA'_0 = \sum_{i=1}^m \xi_i EcTA'_i + \frac{1}{2} t_0 \sqrt{\sum_{i=1}^m \lambda'_i (TA'_i)^2} \quad (38)$$

$$EiA'_0 = \sum_{i=1}^m \xi_i EcTA'_i - \frac{1}{2} t_0 \sqrt{\sum_{i=1}^m \lambda'_i (TA'_i)^2} \quad (39)$$

Использование метода неполной взаимозаменяемости эффективно в условиях серийного и массового производства в размерных цепях с достаточно большим количеством звеньев. Но и неполная взаимозаменяемость имеет свои ограничения области применения и они принципиально те же, что и при полной, т.е. техническая невозможность при некотором  $m$  получить точ-

ность, соответствующую  $TA'_{cp}$  и экономическая целесообразность, выраженная допустимым процентом, (вероятностью) появления выходящих за установленный допуск изделий.

Что касается затрат на "исправление" выбракованных изделий, то они сводятся к затратам на их разборку. Детали этих изделий после разборки включаются в следующую партию, поступающую на сборку, и в новых случайных сочетаниях с другими могут дать изделие с показателем точности в пределах установленного конструктором допуска.

#### *Метод групповой взаимозаменяемости*

В малозвенных размерных цепях с высокой точностью замыкающего звена, когда средний допуск составляющих звеньев оказывается физически недостижим, либо затраты на его обеспечение делают метод полной взаимозаменяемости экономически неприемлемым, применяется метод групповой взаимозаменяемости. Сущность метода заключается в том, что требуемая точность замыкающего звена достигается при включении в размерную цепь составляющих звеньев из одной из групп, на которые они предварительно рассортированы.

Таким образом, за счет введения предварительной сортировки на группы всех деталей при механообработке удастся изготавливать их с более широкими производственными допусками и при сборке изделий из деталей, принадлежащих к одной и той же группе, иметь полную взаимозаменяемость со всеми ее достоинствами

Очевидно, что с экономической точки зрения этот метод целесообразен, если дополнительные расходы на сортировку, отдельные транспортировку и хранение деталей не превышают снижения затрат при механообработке по расширенным допускам.

С технической стороны рассчитывают средний допуск составляющего звена, как при полной взаимозаменяемости, т.е. по формуле

$$TA_{cp} = \frac{TA_0}{m}, \quad (40)$$

и затем увеличивают это значение в  $k$  раз, где  $k$  - число будущих групп сортировки:

$$TA'_{cp} = TA_{cp} \cdot k \quad (41)$$

При организации групповой взаимозаменяемости необходимо обеспечить выполнение 3-х технических условий:

1. первое техническое условие: допуски составляющих звеньев должны быть равны между собой. Если это условие не будет выполняться, то средний зазор (или натяг) будет увеличиваться или уменьшаться с увеличением номера группы, и, в принципе, не исключается возможность того, что в какой-то группе зазор может перейти в натяг или натяг в зазор. В таком виде это условие справедливо для 3-х звенной размерной цепи. Для того чтобы сформулировать первое условие для многозвенной цепи, вспомним, что любую размерную цепь можно заменить трехзвенной, если просуммировать между собой отдельно все увеличивающие и все уменьшающие звенья.

2. второе техническое условие относится к погрешностям

формы поверхностей детали или их относительного поворота. Это условие заключается в том, что допустимые погрешности формы поверхности (овальность, конусность и т.д.) или относительного поворота (например, непараллельность) не должны превышать допуск размера, назначаемый из условия полной взаимозаменяемости, т.е. не выходить за границы одной группы сортировки. Если допустить нарушение этого условия, то одну и ту же деталь, измеренную в разных местах, можно будет отнести в разные группы, что превращает сортировку в процесс с неопределенным результатом, а следовательно, становится неопределенным и качество собираемых из таких групп деталей изделий.

3. третьим техническим условием является необходимость обеспечения при изготовлении деталей идентичности кривых рассеяния у всех составляющих звеньев. При нарушении этого условия в одной и той же группе после сортировки может оказаться разное количество деталей, в результате чего в каждой группе окажется некоторое количество деталей "без партнера", из которых невозможно собрать годные изделия.

Экономические и технические условия ограничивают область применения метода групповой взаимозаменяемости малозвенными размерными цепями в условиях крупносерийного и массового производства для достижения наиболее высокой точности замыкающих звеньев.

### *Метод пригонки*

Сущность метода заключается в том, что требуемая точность замыкающего звена достигается изменением величины од-

ного из составляющих звеньев путем съема слоя материала.

В этом случае номинальные размеры, допуски и координаты их середин для всех соответствующих звеньев назначаются с учетом наименьших затрат на их достижение в заданных производственных условиях. Это означает, что при изготовлении деталей по этим допускам и сборке из них изделия замыкающее звено получит рассеяние по полю

$$TB'_0 = \sum_{i=1}^m [\xi_i] TB_i \succ TB_0 \quad , \quad (42)$$

где  $TB_0$  - допуск замыкающего звена, заданный конструктором.

Разность  $TB_0 - TB'_0 = \delta_k$  представляет собой ту излишнюю погрешность, которую из размерной цепи нужно удалить, снимая слой материала с одной из деталей. Эту деталь называют компенсатором. Она несет на себе составляющее звено размерной цепи, которое называют компенсирующим.

При выборе компенсирующего звена руководствуются двумя соображениями:

1. Компенсирующим не может быть общее звено нескольких параллельно связанных размерных цепей, иначе при достижении точности в одной из них в другой достигнутая точность нарушается.

2. Компенсатором должна быть деталь, с которой наиболее просто и с наименьшими затратами может быть удален необходимый для пригонки слой материала. Обычно при использовании пригонки в конструкцию машины вводят специальную деталь в

виде проставочного кольца, прокладки или другой подобной простой детали.

Задача теперь сводится к тому, чтобы гарантированно обеспечить на детали - компенсаторе слой материала, необходимый для пригонки.

Если в качестве компенсатора используется проставочное кольцо, то в его размер необходимо внести некоторую поправку  $\Delta_k$ , которая гарантировала бы на этом кольце достаточный для пригонки изделия слой металла. Эту поправку нужно посчитать по соответствующей формуле. Вычисленную поправку вносят в координату середины поля допуска компенсирующего звена, в результате чего оно смещается.

Достоинством метода пригонки является то, что на замыкающем звене любой размерной цепи (т.е. со сколь угодно большим числом составляющих звеньев  $m$ ) можно достичь очень высокую точность.

Но это достоинство сопровождается несколькими недостатками, которые ограничивают область применения метода. К ним относятся:

1. Необходимость частичной разборки каждого изделия после измерения в нем фактической величины замыкающего звена для извлечения компенсатора на пригонку.

2. Необходимость иметь в технологическом процессе сборки операцию механической обработки со всеми возникающими при этом проблемами.

3. Разная величина припуска на пригонку на компенсаторе (от нуля до  $\delta_k$ ) и вытекающая отсюда различная продолжитель-

ность пригоночных работ на каждом изделии, что затрудняет нормирование сборки и организацию ритмичного потока в крупносерийном и массовом производстве.

Поэтому метод пригонки применяют для достижения высокой точности в многозвенных цепях в условиях единичного и мелкосерийного производства.

### *Метод регулирования*

Сущность метода заключается в том, что требуемая точность закрывающего звена размерной цепи достигается изменением величины одного из составляющих звеньев баз съема с него материала.

Теоретически метод аналогичен пригонке, отличается лишь техника изменения величины компенсирующего звена. Не снимая слоя материала с компенсирующего звена, можно изменять его величину дискретно или непрерывно.

Дискретное регулирование осуществляется неподвижным компенсатором. Примером такого неподвижного компенсатора может служить проставочное кольцо. Изменение зазора можно обеспечить, заменив проставочное кольцо другим, заранее изготовленным, но с другим размером.

Для реализации этой идеи при оборке изделия необходимо:

1. Назначить на все составляющие звенья размерной цепи экономически достижимые допуски  $TB_i$  и координаты их середин  $EcTB_i$ .

2. Рассчитать величину компенсации  $\delta_k = TB_0' - TB_0$ .

3. Выбрать компенсирующее звено.

4. Рассчитать поправку  $\Delta_k$  и внести ее в координату середины поля допуска компенсирующего звена.

5. Рассчитать количество ступеней размера компенсирующего звена по формуле

$$N = \frac{\delta_k}{TB_0 + 1} \quad (43)$$

Вычислением и внесением соответствующей поправки  $\Delta_k$  в координату компенсирующего звена можно определить его минимальное значение или же, наоборот, его максимальное значение.

6. Рассчитать количество компенсаторов каждой ступени.

При непрерывном регулировании подвижным компенсатором в конструкции машины или сборочной единицы должен быть предусмотрен специальный механизм регулирования.

Сопоставление метода регулирования с пригонкой показывает, что регулирование неподвижным компенсатором целесообразно использовать в крупносерийном или массовом производстве, когда дополнительные расходы на изготовление компенсаторов разных размеров оказывается ниже, чем затраты на пригонку, и есть уверенность, что, в конце-концов, каждый изготовленный впрок компенсатор найдет применение в одном из изделий, чего может и не произойти в единичном или мелкосерийном производстве.

При регулировании же подвижным компенсатором нет принципиальных ограничений технического характера для использования этого метода в производстве любого типа. Целесо-

образность его применения может быть ограничена только экономическими соображениями, так как введение в конструкцию регулирующего устройства взамен неподвижного компенсатора всегда связано с усложнением, а, следовательно, и с удорожанием конструкции. Оправдать такое удорожание можно только существенной экономией на трудоемкости сборочных работ, а это обычно достигается при серийном и массовом выпуске изделий.

### *Метод подбора составляющих звеньев*

Сущность метода заключается в том, что требуемая точность замыкающего звена размерной цепи достигается подбором составляющих звеньев с частично или полностью компенсирующими отклонениями.

Теоретически метод основан на механизме образования отклонения замыкающего звена в размерной цепи единичного изделия. Это отклонение формируется как алгебраическая сумма отклонений всех составляющих звеньев:

$$E_0 = \sum_{i=1}^m \xi_i E_i$$

где  $E_i$  -единичное отклонение составляющего звена (размера конкретной детали, включаемой в собираемое изделие).

Принципиально возможно все изготовленные детали распределить по таким комплектам, в которых сумма  $\sum_{i=1}^m \xi_i E_i$  была

бы равна нулю, особенно если таких деталей и комплектов доста-

точно много (как в крупносерийном или массовом производстве), еще легче такую задачу решить, если дать возможность этой сумме хотя бы немного отличаться от нуля.

Однако реализация этой принципиальной возможности сопряжена с огромными затруднениями организационно-экономического плана:

- требуется измерить абсолютно все детали по составляющим звеньям размерной цепи и связать неразрывно эту информацию с каждой деталью;

- необходимо вести непрерывные расчеты по формуле

$$E_0 = \sum_{i=1}^m \xi_i E_i, \text{ перебирая возможные сочетания составляющих}$$

звеньев, пока  $E_0$  не будет меньше допустимого; из большого количества изготовленных деталей отбирать вошедшие и соответствующий комплект.

Реализация этого метода на практике становится возможной с внедрением в машиностроительное производство микропроцессорной техники, автоматических методов измерения и идентификации деталей, систем адресного хранения и перемещения деталей и т.д. Эти устройства берут на себя все расчеты и автоматический подбор составляющих деталей.

На практике этот метод реализуется, как правило, для изделий высокой точности. Метод требует разработки специального программного обеспечения, создания систем автоматизации технологических и транспортных процессов.

### 3.4. Достижение точности изготовления деталей

Из практики изготовления деталей известно, что на их конечную точность влияет большое количество погрешностей. Оценка ее при одновременном воздействии погрешностей представляется особенно затруднительной. Поэтому вполне обоснованным считается подход, когда оценивают только основные погрешности, суммарное воздействие которых незначительно отличается от суммарного воздействия всех погрешностей. Суммарная погрешность включает в себе следующие виды погрешностей: погрешность, связанная с установкой заготовки на металлорежущий станок или в приспособление; погрешность, вызванная упругими деформациями технологической системы; погрешность, возникающая в результате размерного износа режущих инструментов; погрешность, связанная с настройкой режущих инструментов; погрешность, вызываемая тепловыми деформациями ТС; погрешность, связанная с геометрическими отклонениями оборудования.

Как правило, деталь изготавливают в два этапа. Сначала получают заготовку, которая в какой-то степени по форме и размерам приближается к готовой детали. Степень этого приближения может быть разной и определяется особенностями используемого ТП заготовительного производства. Выбор того или иного метода получения заготовки и соответствующего ТП определяется целым рядом условий технического и экономического характера. Технологическими возможностями достижения заданных показателей точности поверхности детали являются: 1) выбор соот-

ветствующего метода получения заготовки; 2) однократная обработка поверхности в одной ТС; 3) последовательная обработка поверхности в нескольких ТС.

Требуемые показатели точности поверхности, как правило, обеспечиваются выбранным методом обработки и правильно-стью назначения технологических баз. При обработке одной поверхности на детали возможны несколько вариантов схем базирования заготовки в приспособлении станка. Здесь уместно ввести понятие «технологический размер». Под *технологическим* понимают размер, определяющий во время обработки детали положение обрабатываемой поверхности относительно используемой технологической базы. Величина и погрешность такого размера определяются только используемой для обработки ТС и условиями ее работы. Технологический размер, получаемый на данной операции (переходе), и его погрешность не зависят от предшествующей или последующей обработок. Технологический размер формируется как замыкающее звено некоторой размерной цепи ТС, составляющими звеньями которой являются ее внутренние размеры.

Для достижения наиболее высокой точности конструкторских размеров расположения поверхностей следует в качестве технологической базы для каждой из них использовать конструкторскую размерную базу. Это положение получило название «*принцип совмещения баз*». Следующий важнейший принцип при обеспечении точности конструкторских размеров получил название «*принцип единства баз*». Он гласит: при выборе технологической базы необходимо стремиться использовать на всех или большинстве операций ТП одну и ту же (единую) технологию

скую базу.

При выборе технологических баз стремятся к более полному соблюдению принципа совмещения баз. В этом случае погрешности базирования существенно уменьшаются, и точность изготовления детали повышается. При невозможности выдержать этот принцип за технологическую базу принимают другую поверхность, стремясь уменьшить последствия несовмещения баз путем назначения по возможности жестких допусков на размер и расположение, связывающие новую базу с предшествующей. Соблюдение принципа постоянства баз способствует повышению точности взаимного расположения обрабатываемых поверхностей заготовки. Высокая точность по соосности поверхностей вращения обеспечивается путем установки заготовок на разных операциях (переходах) на одну и ту же технологическую базу. Лучший результат при этом будет в случае выполнения всех переходов за одну установку заготовки (т.е. за одно базирование и закрепление). При нескольких установках на одну и ту же базу точность взаимного расположения обрабатываемых поверхностей снижается. Выдерживание принципа постоянства баз повышает однотипность схем установки и приспособлений, что весьма важно при автоматизации процесса обработки. Стремление к более полному выдерживанию этого принципа приводит к созданию на заготовке и на детали искусственных технологических баз (отверстий с параллельными осями, центровых отверстий, установочных поясков и шеек, бобышек, платиков и других элементов). При вынужденной смене баз нужно переходить от менее точной базы по размерам, форме и расположению к более точной. К выбранным базам должны быть сформулированы требования точности и шерохова-

тости.

На этапе выбора технологических баз необходимо учитывать показатели точности детали: расстояние между двумя поверхностями и поворот одной поверхности относительно другой (угловой размер). *Технологическим комплексом* называется совокупность поверхностей, на которые чертежом установлены жесткие допуски на взаимное расположение или на координатную связь. При этом одна из связанных между собой размерами поверхностей использована конструктором в качестве конструкторской размерной базы.

Для обеспечения этих показателей точности в технологическом процессе изготовления детали применяются два способа:

- копирование на детали соответствующего размера инструмента, комплекта инструментов или станка;
- соответствующий выбор технологических баз, связанных при обработке размерами взаимного расположения поверхностей.

При первом способе точность взаимного расположения двух поверхностей решается до начала обработки их на стадии создания этого размера в инструменте при его изготовлении, в комплекте инструментов многоинструментальной наладки или в технологическом оборудовании при настройке. Применение второго способа производится с учетом принципов совмещения и единства технологических баз.

#### *Этапы технологического процесса механической обработки*

При обеспечении качества выпускаемой детали приходится каждый раз решать задачу по проектированию и выбору одно-

го наиболее рационального варианта принципиальной схемы обработки детали. Исходными данными является информация о форме, размерах и точности обрабатываемой детали, а также программа выпуска. Технологический процесс может быть разделен на 13 этапов обработки в зависимости от характера и точности обработки (табл.4).

Таблица 4

Этапы технологического процесса

Номер этапа	Наименование	Назначение и характеристика
Э1	Заготовительный	Получение заготовки и ее термообработка
Э2	Черновой	Съем лишних напусков и припусков
Э3	Термический 1	Термообработка – улучшение, старение
Э4	Получистойой 1	Точность обработки 10-12 квалитет, шероховатость поверхности $Ra \geq 3,2$ мкм
Э5	Термический 2	Цементация
Э6	Получистойой 2	Съем цементированного слоя на поверхностях, предохраняемых от цементации
Э7	Термический 3	Закалка, улучшение
Э8	Чистойой 1	Точность обработки 6-9 квалитет, шероховатость поверхности $Ra \geq 0,63$ мкм
Э9	Термический 4	Азотирование, старение
Э10	Чистойой 2	Шлифование поверхностей, предохраняемых от азотирования

Э11	Чистовой 3	Точность обработки 5-6 квалитет, шероховатость по- верхности $Ra \geq 0,2$ мкм
Э12	Гальванический	Хромирование, никели- рование и др.
Э13	Доводочный	Получение высокой чи- стоты поверхности до $Ra=0,05 -$ $0,025$ мкм

Разделение ТП на этапы, выполняемые в порядке возрастания точности этапа, т.е. от черновых к чистовым, обеспечивает наиболее высокую точность и производительность обработки детали.

Обработка на черновых этапах производится на станках, допускающих съем больших припусков на высоких режимах резания, т.е. с наибольшей производительностью. Большие деформации детали, возникающие вследствие перераспределения внутренних напряжений при снятии поверхностных слоев металла и больших зажимных усилий, не приводят к браку, так как на этих этапах не производится точная обработка.

Для выполнения операций на получистовых и чистовых этапах применяются точные станки, обеспечивающие достижение заданной точности и чистоты поверхности наиболее производительными методами. Кроме того, разделению ТП на этапы способствуют термообработка и термохимические операции. Термообработка увеличивает число этапов ТП обработки детали, так как для устранения деформаций и получения требуемого качества поверхности после термических и термомеханических операций необходима механическая обработка. Например, в ряде случаев выделение отдельно чернового и получистового этапа обусловлено необходимостью проведения термообработки или старения детали.

Разделение чистой обработки на два этапа вызвано необходимостью проведения азотирования или старения детали. Этапы 6, 8, 10, 11, 13 относятся к обработке отдельных поверхностей, этапы 4, 5, 7, 9, 12 – как к отдельным поверхностям, так и к детали в целом.

Ряд операций обработки (или технологических переходов), необходимых для получения каждой поверхности детали и расположенных в порядке повышения точности, образуют маршруты обработки отдельных поверхностей. Маршрут обработки назначают на основании технических требований чертежа детали и заготовки, начиная с выбора метода окончательной обработки, обеспечивающей заданные чертежом детали точность и шероховатость поверхности.

Используя таблицы точности и качества поверхности, таблицу этапов обработки поверхностей и учитывая конфигурацию обрабатываемой поверхности, материал, массу и другие факторы, устанавливают метод окончательной обработки, который обеспечивает получения требуемой точности и качества поверхностей ( $T_d$ ,  $Ra_d$ ).

Зная метод получения заготовки, ее точность и качество ( $T_z$ ,  $Ra_z$ ), назначают промежуточные методы обработки или план обработки поверхности с помощью уточнения, учитывая, что каждый последующий метод обработки должен быть точнее предыдущего.

Число этапов обработки (черновой, получистой, чистой, тонкой) зависит не только от точности размеров, но и от уровня геометрической точности формы поверхностей. Исходя из данных о точности исходной заготовки и готовой детали,

определяют требуемую величину уточнения, которую надо обеспечить в результате обработки:

$$\varepsilon_T = \frac{T_3}{T_D}, \quad (44)$$

где  $T_3$  - погрешность заготовки;

$T_D$  - погрешность детали.

Затем определяется величина уточнения за каждый назначенный переход или операцию, как отношение точности на предшествующем переходе к выполняемому:

$$\varepsilon_i = \frac{T_{i-1}}{T_i}. \quad (45)$$

Общее уточнение находится как произведение уточнений за каждый переход:

$$\varepsilon_{\text{общ}} = \prod_{i=1}^n \varepsilon_i. \quad (46)$$

Требуемая точность детали (поверхности) обеспечивается при выполнении условия:  $\varepsilon_{\text{общ}} \geq \varepsilon_T$ . (47)

На число этапов обработки может влиять и необходимость выполнения термической обработки, которая может вытекать из требований чертежа и условий улучшения обрабатываемого материала.

При составлении маршрута обработки следует руководствоваться следующими соображениями:

1. В первую очередь надо обрабатывать поверхности детали, которые являются базами для дальнейшей обработки.

2. Затем следует обрабатывать поверхности, с которых снимается наиболее толстый слой металла, так как при этом

легче обнаруживаются внутренние дефекты заготовки.

3. Операции, где существует вероятность брака из-за дефектов в материале или сложности механической обработки, должны выполняться в начале процесса.

4. Далее последовательность операций устанавливается в зависимости от требуемой точности поверхности: чем точнее должна быть поверхность, тем позднее она должна обрабатываться, так как обработка каждой последующей поверхности может вызвать искажение ранее обработанной из-за перераспределения внутренних напряжений при снятии слоя.

5. Поверхности, которые должны быть наиболее точными и гладкими, должны обрабатываться последними, этим уменьшается возможность их повреждения.

6. Совмещение черновой и чистовой обработки на одном и том же станке может привести к снижению точности обработанной поверхности вследствие влияния значительных сил резания и сил зажатия при черновой обработке и большого износа деталей станка.

7. По возможности использовать минимальный ассортимент оборудования, приспособлений и инструмента.

8. Термическая операция производится, как правило, в середине технологического процесса.

#### *Этапы достижения точности детали при механической обработке*

Весь процесс однопереходной обработки условно можно разбить на три этапа: установку, статическую настройку и дина-

мическую настройку. Каждый из этих этапов представляет собой законченную часть обработки, независимую от других и выполняется последовательно во времени.

Рассмотрим содержание этапов и их роль в образовании технологических размеров на примере фрезерования плоскости, положение которой задается размерами  $A_K$  и  $\alpha_K$  (рис.22).

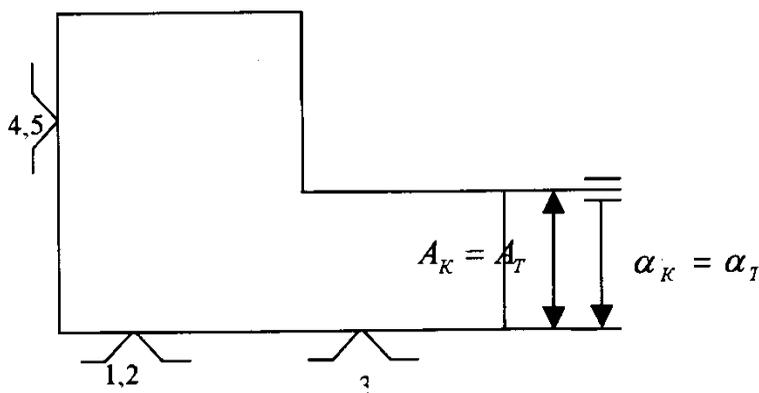


Рис. 22. Схема базирования заготовки при получении линейного размера  $A_K$

Итак, первый этап – *установка*. Под установкой понимают часть технологической операции (ТО), включающей действия, направленные на введение заготовки в кинематические и размерные цепи технологической системы (ТС), а также на придание ей определенного положения. Содержание этого этапа описывается теорией базирования. Установка состоит из базирования и закрепления, достигнутое положение заготовки относительно выбранной системы координат описывается размерами установки:  $A_U$  и  $\alpha_U$ . При установке партии заготовок эти размеры получают рас-

сеяния, и их поля называют погрешностями установки  $\omega_{Ay}$  и  $\omega_{Ay}$ . В общем случае обозначаются  $\omega_u$ .

Второй этап – *статическая настройка*. Это совокупность действий, направленных на придание режущим кромкам рабочего инструмента определенного начального положения в неработающей технологической системе относительно тех же исполнительных поверхностей приспособления или станка, которые используются на этапе установки (рис.23).

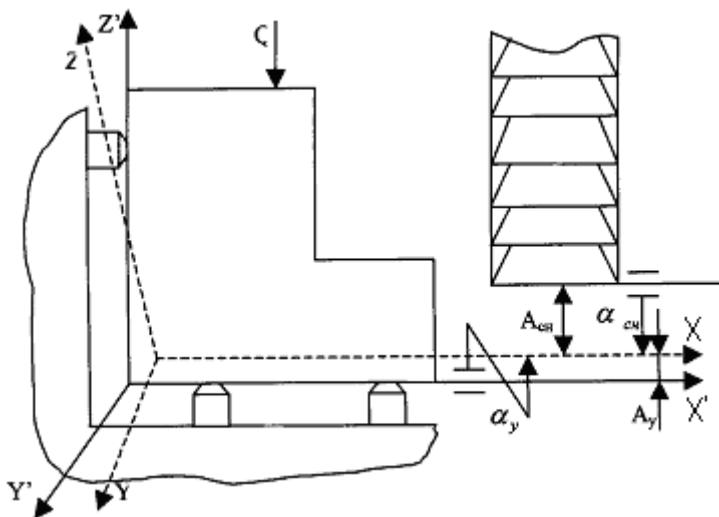


Рис. 23. Схема формирования технологического размера при статической настройке

Положения инструмента в координатном направлении  $Z$  в статическом состоянии  $TC$  определено размерами  $A_{сн}$  и  $\alpha_{сн}$  относительно исполнительных поверхностей установочных элементов приспособления. Такие размеры называют размерами статической

настройки (рис.24). Эти размеры формируются с некоторым отклонением от заданных значений и при повторах процесса в случаях замены затупившихся инструментов размеры  $A_{сн}$  и  $a_{сн}$  претерпевают рассеяние в некоторых пределах. Образующиеся поля рассеяния  $\omega_{A_{сн}}$  и  $\omega_{a_{сн}}$  называют погрешностями статической настройки, и в общем случае обозначаются  $\omega_{сн}$ .

Третий этап – *динамическая настройка*. Это непосредственное взаимодействие режущих кромок инструмента с материалом заготовки, в результате которого создается на детали новая поверхность, заданная конструктором. Этот процесс сопровождается всей совокупностью явлений, присущих процессу резания: возникают силы резания, действующие на инструмент и заготовку, выделяется тепло пластической деформации стружки и трения инструмента об обрабатываемую поверхность, инструмент изнашивается и затупляется и т.д. В результате всех этих процессов изменяется взаимное положение заготовки и инструмента, достигнутое в статическом состоянии ТС на первых двух этапах.

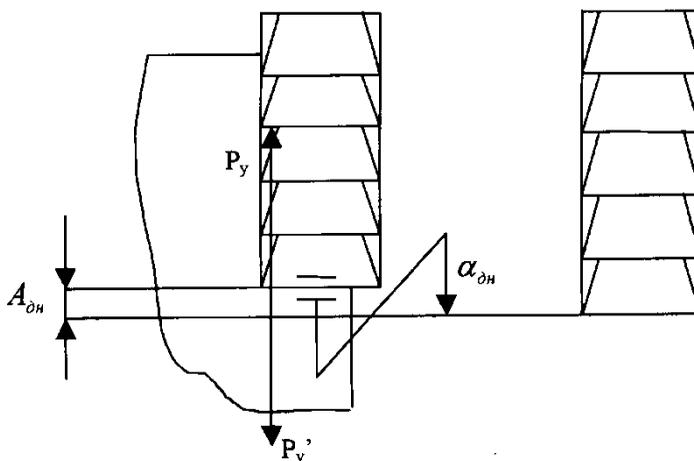


Рис. 24. Схема формирования технологического размера при динамической настройке

Под действием составляющей силы резания  $P_y$  инструмент перемещается в результате упругих деформаций вверх, а заготовка вниз. В результате чего размер статической настройки  $A_{ст}$  получает приращение. Он также получает приращение в результате износа инструмента, тепловой деформации заготовки и т.д. Результат этих изменений можно описать размерами  $A_{дн}$  и  $a_{дн}$ : это размеры динамической настройки, которые определяют положение режущей кромки инструмента в динамике относительно положения этой же кромки в статике. При обработке партии заготовок, а также из-за нестабильности силы резания эти размеры приобретают поля рассеяния  $\omega_{A_{дн}}$  и  $\omega_{a_{дн}}$ , которые называются погрешностями динамической настройки и в общем случае обозначаются  $\omega_{дн}$ .

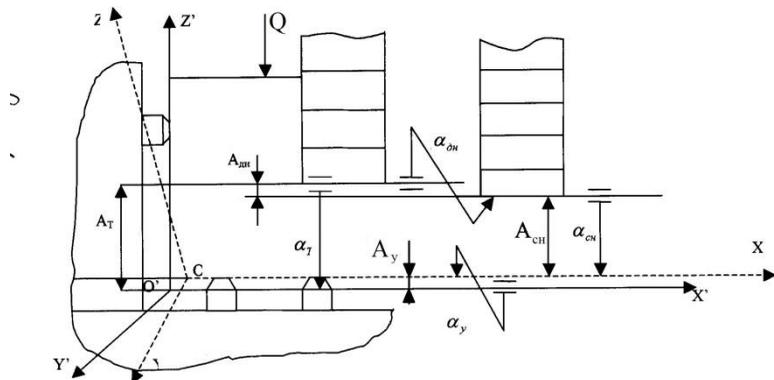


Рис. 25. Схема формирования технологического размера при фрезеровании паза

Рассмотрим все три этапа совместно. В результате выполнения всех этапов получается обработанная деталь с технологическими размерами  $A_T$  и  $\alpha_T$  (рис.25). Эти размеры замыкают контуры предшествующих размеров и отвечают определению теории размерных цепей. Поэтому для них справедливы уравнения:

$$A_T = \xi_1 A_y + \xi_2 A_{сш} + \xi_3 A_{дн}, \quad (48)$$

$$\alpha_T = \xi_1 \alpha_y + \xi_2 \alpha_{сш} + \xi_3 \alpha_{дн}, \quad (49)$$

где  $\xi$  - передаточное отношение, или

$$\omega A_T = \omega A_y + \omega A_{сш} + \omega A_{дн}, \quad (50)$$

$$\omega \alpha_T = \omega \alpha_y + \omega \alpha_{сш} + \omega \alpha_{дн}. \quad (51)$$

В общем случае погрешность однопереходной обработки можно записать:

$$\omega A_{обр} = \omega A_T = \omega_y + \omega_{сш} + \omega_{дн}, \quad (52)$$

т.е. погрешность технологического размера при обработке

есть сумма погрешностей установки, статической и динамической настроек. Из последней формулы следует, что повышения точности обработки, т.е. уменьшения погрешности технологического размера можно добиться, уменьшая погрешности установки, статической и динамической настроек.

**Методы установки заготовки в ТС.** Различают два способа установки заготовок: в приспособление и с выверкой положения заготовки на станке. При первом способе требуемое положение заготовки ( $A_y$ ) достигается всякий раз, как только её технологические базы входят в контакт с исполнительными поверхностями установочных элементов приспособления. В этом случае процесс образования размера  $A_y$  и его погрешности  $\omega_y$  полностью описывается теорией базирования.

При втором способе установки заготовка может во время её базирования перемещаться в нескольких координатных направлениях. Достигнутое положение технологической базы относительно исполнительных поверхностей станка проверяется измерительным инструментом, и по результатам измерения определяются и вносятся поправки в размеры  $A_y$  и  $a_y$ . Этот процесс называют *выверкой*, а способ – установкой с выверкой положения заготовки.

**Структура погрешности установки.** Из теории базирования известно, что

$$\omega_y = f(\omega_{OB} + \omega_{BB} + \omega_{HB} + \omega_3), \quad (53)$$

где  $\omega_{OB}$  - погрешность изготовления основной базы базлируемой детали;  $\omega_{BB}$  - погрешность изготовления вспомогательной

базы базирующей детали;  $\omega_{НБ}$  - погрешность неопределенности базирования;  $\omega_3$  - погрешность закрепления.

Эта формула показывает источники появления погрешности размера установки  $A_u$ . Так как функцию основной базы при установке заготовки на станке, выполняет ее технологическая база, то  $\omega_{ОБ}$  трансформируется в погрешность изготовления технологической базы  $\omega_{ТБ}$ .

Функцию вспомогательной базы выполняет исполнительная поверхность станка или установочных элементов приспособления. Поэтому  $\omega_{ВБ}$  представляет собой погрешность исполнительных поверхностей приспособления или станка. Величина этой погрешности определяется первоначальной неточностью изготовления этих поверхностей  $\omega_{ИЗГ}$ , полученной при изготовлении станка или приспособления и накопленной дополнительной погрешностью  $\omega_{ИЗН}$ , вызванной их износом. Тогда можно записать:

$$\omega_{ВБ} = \varphi(\omega_{ИЗГ}, \omega_{ИЗН}), \quad (54)$$

где  $\omega_{ИЗН}$  - погрешность износа;

$\omega_{ИЗГ}$  - погрешность изготовления.

При установке заготовок в приспособление неопределенность базирования присутствует, когда схема базирования содержит неопределенность, а ее величина определяется пределами возможных перемещений заготовки во время базирования и описывается  $\omega_{НБ}$ . Это имеет место, когда установка проводится с зазорами. При установке с выверкой  $\omega_{НБ}$  имеет место всегда, так как заготовка перемещается во время базирования. Пределом

величины таких неуправляемых перемещений выступает в этом случае погрешность измерения, обусловленная выбранной схемой измерения, точностью измерительного инструмента, квалификацией рабочего.

Таким образом, при установке с выверкой:  $\omega_{НБ} = \omega_{ИЗМ}$ .

Тогда погрешность установки для случая установки заготовки в приспособление запишется:

$$\omega_V = f(\omega_{ТБ}, \omega_{ИЗГ}, \omega_{ИЗН}, \omega_{НБ}, \omega_3). \quad (55)$$

Для случая установки с выверкой:

$$\omega_V = f(\omega_{ТБ}, \omega_{ИЗМ}, \omega_3). \quad (56)$$

### **Источники погрешности статической настройки.**

Размер статической настройки описывает взаимное расположение исполнительных поверхностей инструмента и приспособления в собранной технологической системе и является замыкающим звеном в некоторой размерной цепи, составляющими звеньями которой будут размеры отдельных элементов этой технологической системы.

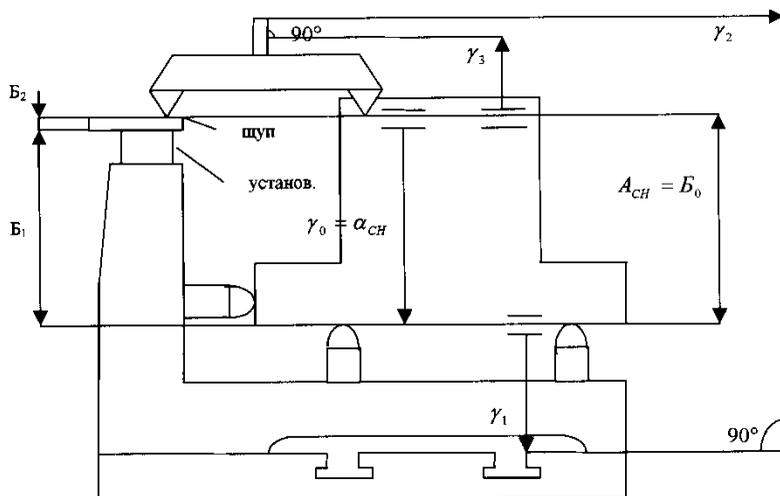


Рис.26. Размерные цепи статической настройки ТС вертикально-фрезерного станка

На рис.26 приведены размерные цепи статической настройки на размер  $A_{CH}$  и относительный поворот  $\alpha_{CH}$  технологической системы для фрезерования плоскости на заготовке.

Размер  $A_{CH}$  от плоскости исполнительной поверхности установочных элементов приспособления до вершины зуба фрезы формируется в ТС при подъеме стола станка до контакта вершины зуба со щупом, размещенным на установе приспособления. Тогда  $A_{CH}=B_0$  – замыкающее звено размерной цепи, составляющие звенья которой:  $B_1$  – размер приспособления между плоскостью установочных элементов и плоскостью установа;  $B_2$  – размер щупа. Из размерной цепи:

$$\omega_{CH} = \omega B_1 + \omega B_2, \quad (57)$$

где  $\omega B_1$  и  $\omega B_2$  - неточность изготовления приспособления и по-

грешность измерения, вызванная неточностью изготовления мерительного инструмента и неточностью определения момента контакта зуба фрезы со щупом.

Поворот (непараллельность)  $\alpha_{CH}$  плоскости вращения вершин зубьев фрезы относительно плоскости исполнительных поверхностей установочных элементов является замыкающим звеном размерной цепи  $\gamma_0 = \alpha_{CH}$ , составляющими звеньями которой являются: поворот (непараллельность) плоскости установочных элементов относительно плоскости основания (ОБ) корпуса приспособления  $\gamma_1$ ; неперпендикулярность оси шпинделя к плоскости стола станка  $\gamma_2$ ; неперпендикулярность плоскости расположения вершин зубьев фрезы к оси вращения шпинделя  $\gamma_3$ . Из этой размерной цепи:

$$\omega\alpha_{CH} = \omega\gamma_0 = \omega\gamma_1 + \omega\gamma_2 + \omega\gamma_3, \quad (58)$$

где  $\omega\gamma_1$  – неточность изготовления приспособления;  $\omega\gamma_2$  – погрешность используемого станка, зависит от неточности его изготовления и износа;  $\omega\gamma_3$  – погрешность, связанная с неточностью установки инструмента в ТС.

Каждое из составляющих звеньев размерной цепи в свою очередь является замыкающим звеном соответствующей размерной цепи.

### **Источники погрешности динамической настройки.**

Во время обработки в зоне резания и во всех частях технологической системы протекают процессы различной физической, химической, физико-химической и другой природы, в результате которых взаимное положение заготовки и инструмента изменяется. К числу таких процессов относятся: динамика резания; пластиче-

ская и упругая деформации материала заготовки; тепловыделение в зоне резания, в приводах и подвижных соединениях ТС; трение и износ в зоне резания и в подвижных соединениях; вынужденные и собственные колебания (вибрации) ТС; химическое и электрохимическое взаимодействие инструмента, технологической жидкости и обрабатываемого материала; теплопередача внутри ТС от более нагретых к менее нагретым частям; теплообмен ТС с окружающей средой и т.д.

Рассмотрим влияние различных процессов, протекающих в технологической системе, на величину погрешностей динамической настройки.

*1. Жесткость технологической системы как причина возникновения погрешности динамической настройки.* Жесткость ТС – способность системы сопротивляться возникновению в ней упругой деформации под действием приложенной нагрузки:

$$J_{ТС} = \frac{P_Y}{Y_{ТС}}, \text{ Н/м,}$$

где  $P_Y$  - нормальная составляющая силы резания;  $Y_{ТС}$  - упругая деформация в технологической системе, измеренная по нормали к обработанной поверхности.

Пример для фрезерования приведен на рис.27.

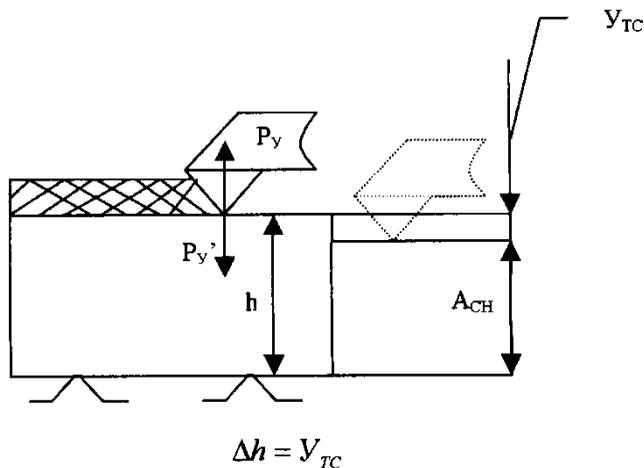


Рис. 27. Влияние упругой деформации ТС на получаемый размер при фрезеровании

Податливость – величина обратная жесткости:

$$\omega = \frac{1}{J_{ТС}}, \text{ м/Н.} \quad (59)$$

Она оценивает способность ТС упруго деформироваться под действием силы и количественно представляет собой упругое перемещение, приходящееся на единицу действующей силы:

$$Y_{ТС} = \frac{P_Y}{J_{ТС}}. \quad (60)$$

Если это отношения было бы постоянным при обработке, то величину упругого перемещения  $Y_{ТС}$  можно было бы компенсировать соответствующей поправкой в размер статической настройки  $A_{сн}$ . Однако величины  $Y_{ТС}$ ,  $P_Y$  и  $J_{ТС}$  не являются постоянными, и сила резания при обработке партии деталей имеет

разброс  $\Delta P_y$ . Эти колебания силы порождают в ТС изменения

величины упругой деформации:  $\Delta Y_{TC} = \frac{\Delta P_y}{j_{TC}}$ . Эта зависимость

представлена кривой на рис.28.

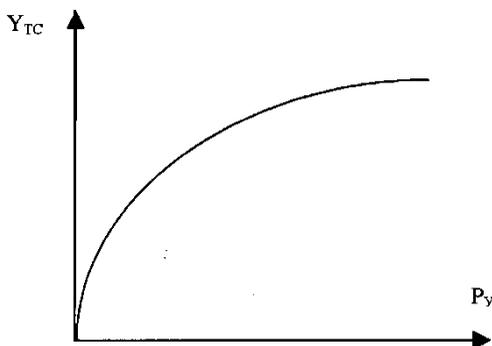


Рис.28. Диаграмма определения жесткости технологической системы

Отсутствие пропорциональности объясняется тем, что перемещение  $Y_{TC}$  в системе возникает за счет: 1) перемещений и поворотов отдельных частей ТС в пределах зазоров в подвижных соединениях; 2) контактных упругих деформаций в стыках деталей; 3) объемных упругих деформаций деталей. Каждая из составляющих имеет свою зависимость от  $P_y$ , а суммарная величина  $Y_{TC}$  оказывается непропорциональной силе  $P_y$ .

Причиной непостоянства жесткости технологической системы является зависимость ее величины от места приложения силы  $P_y$  (рис.29).

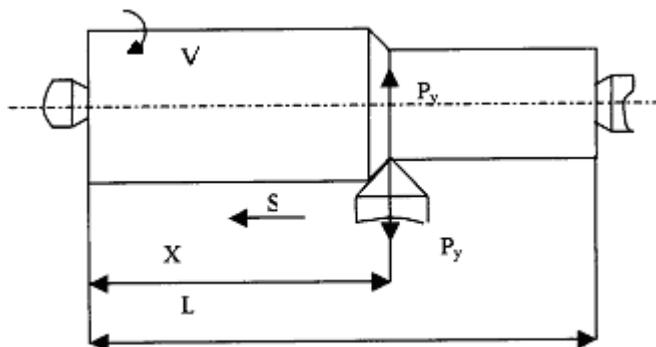


Рис. 29. Схема распределения сил при точении вала

Согласно правилам сопромата величина прогиба вала в сечении на расстоянии  $X$  от передней бабки:

$$Y_D = \frac{P_y}{j_D} = \frac{P_y}{3EI} \cdot \frac{x^2(l-x)^2}{l},$$

где жесткость детали в сечении  $j_D = \frac{3EI}{x^2(l-x)^2}$  и является

переменной величиной.

Суммарное упругое смещение в технологической системе определяется формулой:

$$Y_{ц}^X = Y_{ПБ}^{\max} \left(1 - \frac{x}{l}\right)^2 + Y_{ЗБ}^{\max} \frac{x^2}{l^2} + \frac{P_y}{3EI} \cdot \frac{x^2(l-x)^2}{l}. \quad (61)$$

С учетом упругих перемещений, которые возникают в результате конечной жесткости инструмента и суппорта станка, это уравнение примет вид:

$$Y_{ц}^X = Y_{ПБ}^{\max} \left(1 - \frac{x}{l}\right)^2 + Y_{ЗБ}^{\max} \frac{x^2}{l^2} + \frac{P_y}{3EI} \cdot \frac{x^2(l-x)^2}{l} + \frac{P_y}{j_{суп}} + \frac{P_y}{j_{ин}} \quad (62)$$

Неравномерность жесткости технологической системы

по координате подачи инструмента приводит к появлению погрешности формы обрабатываемой поверхности. Так, реальный диаметр вала будет отличаться от настроенного при статической настройке на удвоенную величину размера динамической настройки:

$$d_{OBR} = d_{CH} + 2A_{DH} = d_{CH} + 2Y_{Ц}^X. \quad (63)$$

В зависимости от соотношения жесткости на валу будет получаться конус, «бочка» или «седло», но не цилиндр.

*2. Колебательные упругие перемещения в технологической системе (вибрации) и их влияние на погрешность динамической настройки.* Помимо рассмотренных перемещений также возникают упругие перемещения, изменению величины которых присуща определенная периодичность. Они называются колебаниями, или вибрациями. Эти колебания являются частью погрешности динамической настройки, из-за которых образуются погрешности формы детали: огранка цилиндрической поверхности при точении, волнистость плоскости при строгании и фрезеровании и т.п. Колебания могут быть вызваны как внешними воздействиями (толчки, сотрясения, вибрации и т.д.), так и внутренними для работающей ТС факторами: прерывистость процесса резания, дисбаланс вращающихся частей, особенности стружкообразования и т.д. Эти колебания могут быть: 1) собственными, вызванные внешними причинами, они являются затухающими; 2) вынужденными, вызванные внешними или внутренними силами, частота которых равна или кратна частоте возбуждающей их силы; 3) автоколебания, появляющиеся одновременно с началом процесса резания и прекращающиеся после отвода инструмента, это неза-

тухающие колебания.

*3. Размерный износ инструмента как причина погрешности динамической настройки.* При обработке резанием происходит износ рабочего инструмента, т.е. постоянно истирается и уносится со стружкой или обрабатываемой поверхностью часть инструментального материала. Результатом износа может быть затупление, что изменяет геометрию резания, приводит к увеличению силы резания, и следовательно, к дополнительным упругим деформациям ТС, которые обуславливают часть погрешности динамической настройки.

*4. Тепловые деформации ТС как причина погрешности динамической настройки.* В работающей технологической системе действует ряд источников тепла: 1) рабочий процесс; 2) механическая работа по преодолению сил трения в подвижных соединениях деталей; 3) электрические системы (двигатели, пусковая и управляющая аппаратура); 4) гидравлические системы (внутреннее и внешнее трение рабочей жидкости); 5) окружающая среда; 6) нагревательные устройства и другое оборудование.

Под влиянием этих тепловых источников нагревается вся технологическая система или отдельные ее части. Следствием этих процессов является упругая тепловая деформация отдельных деталей и частей ТС.

*5. Деформация обрабатываемых деталей в результате перераспределения внутренних напряжений.* Практически каждая поступающая на обработку заготовка несет в себе внутренние (остаточные) напряжения. Они характеризуются знаком, величиной и эпюрой распределения. При механической обработке с заготовки снимается какая-то часть металла, что нарушает равно-

весие внутренних напряжений. Начинается перераспределение напряжений и переход материала в новое равновесное состояние, и этот переход сопровождается деформацией обработанной детали. Эта деформация может протекать постепенно по мере съема припуска или же тормозиться силами крепления заготовки. В последнем случае обработанная деталь деформируется после открепления, и нарушаются ее форма и размеры.

## **4. Качество поверхности деталей машин**

### **4.1. Понятие и общие сведения о качестве поверхности**

Качество поверхностного слоя имеет для машиностроения исключительно большое значение. Для его оценки используют количественные параметры: шероховатость, волнистость и др.

Под качеством поверхности понимают состояние поверхностного слоя, обусловленное геометрическими, физико-механическими свойствами и структурой.

#### *Геометрические свойства поверхностного слоя*

К геометрическим свойствам поверхностного слоя относятся макрогеометрия, микрогеометрия, субмикрогеометрия, субмикрорельеф.

**Макрогеометрия** – это геометрия относительно больших участков поверхности, характеризующая погрешность геометрической формы детали (овальность, гранность, конусность,

волнистость, бочкообразность и т.д.). *Волнистость* - это периодически чередующиеся неровности, шаг которых существенно превышает базовую длину, принятую для измерения шероховатости. Волнистость занимает промежуточное состояние между шероховатостью и отклонениями формы поверхностей. Для шероховатости характерно соотношение  $L/N < 50$ , где  $L$  – базовая длина,  $N$  – высота микронеровностей, для волнистости  $L/N = 50 \dots 1000$  и для отклонений формы  $L/N > 1000$ .

**Микрогеометрия (шероховатость)** – это геометрия малых участков поверхности (микронеровностей), образующихся в результате взаимодействия обрабатываемой поверхности и элементов режущего инструмента или рабочих сред.

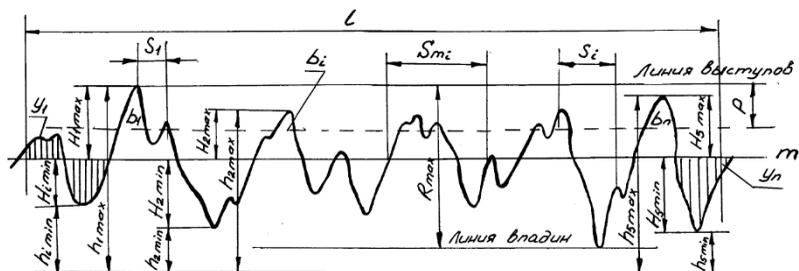


Рис.30. Профиль шероховатости поверхности и его характеристики

**Шероховатость поверхности** – это совокупность неровностей с относительно малыми шагами на базовой длине (рис.22). **Базовая длина**  $l$  – длина базовой линии, используемая для выделения неровностей, характеризующих шероховатость поверхностей. **Базовой линией** служит средняя линия. **Средняя линия**  $m$  – базовая линия, имеющая форму номинального профиля и проведенная так, что в пределах базовой длины среднее

квадратичное отклонение профиля от этой линии минимально.

**Выступы и впадины профиля** – части профиля, ограниченные контуром реальной поверхности и средней линией.

**Шаг неровностей профиля по вершинам**  $S_i$  – длина отрезка средней линии между проекциями на неё двух наивысших соседних выступов.

**Средний шаг неровностей**  $S_m$  и **средний шаг неровностей по вершинам профиля**  $S$  – среднее арифметическое значение шага неровностей соответственно по средней линии и по вершинам неровностей в пределах базовой линии.

$$S_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_{mi} \quad S = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_i \quad (64)$$

**Среднее арифметическое отклонение профиля**  $R_a$  – среднее арифметическое значение абсолютных отклонений профиля от средней линии в пределах базовой длины:

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |y(x)| dx, \text{ или } R_a \approx \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i|. \quad (65)$$

**Высота неровностей по десяти точкам**  $R_z$  – сумма средних абсолютных отклонений точек пяти наибольших минимумов и пяти наибольших максимумов в пределах базовой длины:

$$R_z = \frac{1}{5} \left( \sum_{i=1}^5 |H_{i\max}| + \sum_{i=1}^5 |H_{i\min}| \right). \quad (66)$$

**Наибольшая высота неровностей профиля**  $R_{\max}$  – расстояние между линиями выступов и впадин профиля в пределах базовой длины.

**Опорная длина профиля**  $\eta_p$  – суммарная толщина вы-

ступов, полученная в результате пересечения выступов профиля линии  $m_p$ , эквидистантной средней линии:

$$\eta_p = \sum_{i=1}^n b_i. \quad (67)$$

**Относительная опорная длина профиля**  $t_p$  - отношение опорной длины профиля к базовой линии:

$$t_p = \frac{\eta_p}{l}. \quad (68)$$

**Уровень сечения профиля**  $p$  – расстояние между линией выступов профиля и линией (5-90), пересекающей профиль:

$$p = (5-90) R_{\max} \%. \quad (69)$$

**Направление неровностей** представляет рисунок, образованный на поверхности режущими элементами инструмента в процессе обработки. В зависимости от способа обработки поверхностей применяют следующие знаки.

- для поверхностей, на которые не устанавливается вид обработки:  $\sqrt{R_z 80}$ ;

- для поверхностей, образованных удалением слоев материала, с указанием вида обработки:  $\sqrt{Ra 1,6}$ ;

- для поверхностей, получаемых без удаления материалов, т.е. для заготовок (для литья, штамповки):  $\sqrt[3]{R_z 80}$ .

#### *Физико-механические свойства поверхностного слоя*

**Микротвердость** – это твердость небольших участков материала и отдельных структурных составляющих, это свойство

металла сопротивляться проникновению в него другого более твердого тела определенной формы и размеров, не получающего остаточные деформации.

Микротвердость обозначается Н<sub>μ</sub>, измеряется в кг/мм<sup>2</sup>, определяется путем вдавливания в испытываемую поверхность алмазной четырехгранной пирамиды под различной нагрузкой в зависимости от твердости измеряемого материала. Замеры производят на специальных микрошлифах.

**Остаточными напряжениями** называются напряжения, существующие в деталях при отсутствии внешних воздействий (силовых и температурных).

*Напряжения I рода* – макронапряжения, охватывающие области, соизмеримые с размерами детали. Они возникают в металле в процессе деформации больших объемов в результате взаимодействия структурных составляющих между собой.

*Напряжения II рода* – микронапряжения, распространяющиеся на отдельные зерна металла или на группу зерен. Возникают как при изготовлении, так и в процессе эксплуатации.

*Напряжения III рода* – субмикроскопические, относящиеся к искажениям атомной решетки кристалла, и их ориентация связана со структурой атомной решетки.

Остаточные напряжения характеризуются величиной и знаком (сжатия или растяжения) и глубиной залегания.

#### **4.2. Характеристика важнейших эксплуатационных свойств деталей**

Работоспособность деталей машин определяется в основном их эксплуатационными свойствами. Эксплуатационные свойства деталей в значительной мере определяются состоянием и свойствами поверхностного слоя. Последние определяются условиями обработки: методами, режимами, видом применяемого материала и его состоянием.

Широкий спектр изделий различного назначения характеризуется соответственно и многообразием требований эксплуатационного характера. Входящие в него детали могут подвергаться изнашиванию, усталостному, коррозионному и кавитационному разрушению, к ним могут предъявляться требования термостойкости, отражательной способности, требования эстетического характера.

В числе важнейших эксплуатационных свойств можно отметить следующие.

**Износостойкость** характеризуется сопротивлением поверхности детали изнашиванию. В процессе изнашивания происходит изменение формы и размеров сопрягаемых деталей, нарушаются условия правильной эксплуатации.

**Усталостная прочность**, или предел выносливости, характеризуется напряжением, при котором деталь выдерживает неограниченное число циклов нагружений без разрушения.

**Контактная усталость** – усталость материала в условиях контактной нагрузки.

**Сопротивление коррозии** – сопротивление материала действию коррозионных процессов.

**Отражательная способность** характеризуется количеством отраженного и рассеянного света.

**Опорная поверхность** характеризуется площадью контакта соприкасающихся поверхностей.

**Электрические и магнитные свойства:** электропроводность, прохождение магнитных волн и др.

**Эстетические свойства, товарный вид изделия:** цвет, оттенок, гладкость, блеск и т.д.

**Долговечность** – продолжительность работы детали (изделия) до разрушения или потери работоспособности.

**Надежность** – свойство изделия сохранять работоспособность в течение установленного времени в заданных условиях эксплуатации. Надежность характеризуется безотказной работой изделия в течение заданного времени.

Большинство эксплуатационных свойств в значительной мере определяются состоянием поверхности и поверхностных слоев материалов, несущих на себе наибольшую нагрузку при трении, являющихся местом зарождения усталостных трещин при динамических и знакопеременных нагрузках, местом зарождения коррозионных процессов и т.п. Шероховатость поверхности является одним из основных параметров качества поверхности, определяющим многие эксплуатационные свойства деталей машин: износостойкость, коррозионную стойкость, усталостную прочность, контактную усталость, оптические свойства, прочность прессовых посадок, некоторые электрические свойства. Величина сил трения и износостойкость деталей машин тесно связаны с такими параметрами шероховатости, как высота и форма микронеровностей, опорная поверхность, а также направление обработанных рисок относительно действующих нагрузок. Во многих случаях установлена оптимальная шероховатость, обеспечиваю-

щая наилучшие условия трущихся поверхностей. Например, для подшипников качения оптимальная шероховатость поверхности  $Ra = 0,04 \dots 0,16$  мкм, для гильз цилиндров двигателей  $Ra = 0,08 \dots 0,32$  мкм.

Следы обработки, из которых образуется шероховатость, являются местом зарождения коррозионных процессов и усталостных трещин. Чем грубее следы обработки, тем выше скорость протекания и развития отмеченных процессов.

Увеличение микротвердости способствует повышению износостойкости, усталостной прочности, контактной усталости. Существует определенное значение микротвердости для конкретных условий.

Величина и знак остаточных напряжений оказывают влияние на усталостную прочность, предел выносливости. В большинстве случаев благоприятными являются сжимающие остаточные напряжения.

#### *Влияние качества поверхности на износостойкость деталей машин*

При трении и износе деталей машин на поверхности и в поверхностных слоях металла под влиянием внешних механически воздействий среды, материала трущихся пар, в зависимости от исходного состояния поверхности, теплоты трения возникают и развиваются механические, физические и химические процессы, которые приводят к усталостному и абразивному разрушению.

По классификации Б.И. Костецкого, основными видами износа деталей машин являются:

- **окислительный износ**, характеризуется диффузией кислорода в металл деформируемых при трении поверхностей и образованием твердых и хрупких окислов;

- **тепловой износ**, имеет место при больших скоростях скольжения в теплонагруженных деталях;

- **абразивный износ**, рассматривается как процесс царапания трущихся поверхностей твердыми абразивными частицами;

- **оспвидный износ**, характерен для трения качения.

И.В. Крагельский подразделяет взаимодействие трущихся поверхностей на два вида: а) механическое взаимодействие (внедрение); б) молекулярное (притяжение и схватывание).

По классификации М.М. Хрущева, все разновидности износа разделяют на три группы: 1) механические виды; 2) молекулярно-механические; 3) коррозионно-механические.

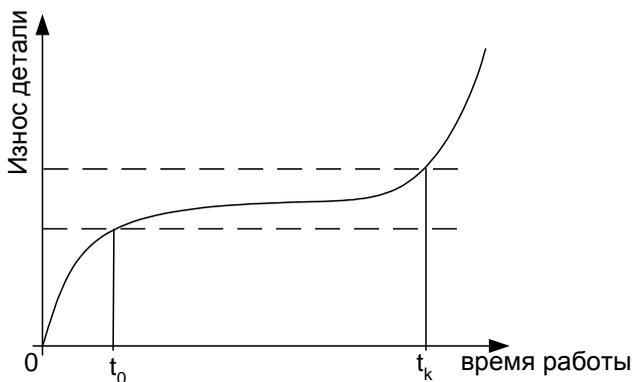


Рис.31. Зависимость износа поверхности детали от времени

Рассмотрим процесс износа трущихся поверхностей.

Вначале сравнительно быстро, за период времени  $(0-t_0)$

(рис.31) происходит процесс истирания выступающих неровностей, т.е. протекает начальный период изнашивания – «приработка» поверхностей. Далее процесс изнашивания протекает медленнее, и этот период ( $t_0 - t_k$ ) определяет срок службы деталей. После точки  $t_k$  происходит катастрофический износ изделия.

Износ шероховатостей поверхности в период ( $0-t_0$ ) происходит следующим образом: контакт трущихся поверхностей осуществляется только по вершинам микронеровностей. При этом площадь фактического касания является наибольшей, и на контактных площадках возникают большие удельные давления, под действием которых происходит упругое сжатие и пластическая деформация смятия микронеровностей, а при взаимном перемещении – деформация среза, обламывания и пластический сдвиг вершин микронеровностей, приводящие к начальному износу.

В период начального износа высота микронеровностей уменьшается на 65-75%, выступы скругляются, площадь фактического касания возрастает, удельные давления уменьшаются. В этот период на поверхности образуется оптимальная шероховатость для данных условий работы.

#### *Влияние физико-механических параметров на износостойкость детали*

Значительно снижают износостойкость детали такие структурные дефекты поверхности, как ожоги, возникающие при шлифовании. Наклеп поверхностных слоев приводит к повышению износостойкости в условиях всех основных видов износа, за исключением абразивного. Наклеп поверхностного слоя, сопровождаемый повышением микротвердости, возникновением сжи-

мающих остаточных напряжений и искажением атомной решетки:

- уменьшает износ за счет смятия микронеровностей, повышая устойчивость поверхности;

- повышает контактную жесткость поверхностного слоя, уменьшает взаимное внедрение, механический и молекулярный износ;

- уменьшает возможность взаимной пластической деформации.

Для повышения износостойкости поверхности детали применяют различные методы механической отделочной и упрочняющей обработки абразивными инструментами и поверхностно-пластическим деформированием, обеспечивающие оптимальную шероховатость, микротвердость и структуру, а также методы нанесения антифрикционных покрытий и твердых пленок, применяют термическую и химико-термическую обработку.

*Влияние качества поверхности на усталостную  
прочность деталей машин*

Усталостная прочность деталей машин зависит от шероховатости поверхности, направления и формы следов обработки, глубины и степени наклепа, величины и знака остаточных напряжений.

Чувствительность металлов усталости растет по мере увеличения ее твердости. Разрушение металла от усталости растет по мере увеличения его твердости. Разрушение металла от усталости происходит вследствие возникновения на поверхности изделия микроскопических трещин, постепенно развивающихся в

глубину его сечения, которые являются концентраторами напряжений. Наряду с изменением микрогеометрии поверхности в процессе механической обработки металлы претерпевают значительные изменения физико-механических свойств: наклеп, нагрев и фазовые превращения в поверхностном слое металла. За счет наклепа усталостная прочность металла возрастает на 20-25% .

С увеличением глубины и интенсивности наклепа усталостная прочность металлов повышается. Изменение характеристики наклепа зависит от метода и режима обработки. При пластическом деформировании имеет место дробление и изменение ориентации блоков и зерен, увеличение линейной дефектности, то есть происходит изменение структуры, характерное для механического наклепа.

Происходящие в процессе механической обработки структурные изменения поверхностного слоя существенно влияют на усталостную прочность деталей машин. Прижоги при шлифовании закаленных сталей резко снижают предел усталости и долговечность сталей. Это снижение прочности объясняется наличием участков концентрации напряжений на стыке переходных структур, а также появлением остаточных растягивающих напряжений, вызванных наличием в поверхностных слоях структур различных удельных объемов. При появлении трещин от ожогов остаточные напряжения снимаются, но предел усталости и долговечности при этом снижаются.

Роль упрочнения при специальных методах упрочняющей технологии аналогична эффекту упрочнения поверхности при механической обработке резанием. Упрочняющими операциями получают значительное увеличение микротвердости и повышение

уровня остаточных напряжений сжатия в поверхностном слое деталей.

Упрочняющие методы поверхностно-пластического деформирования (ППД) поверхностного слоя сильно влияют на усталостную прочность деталей, работающих в агрессивных средах. Создание сжимающих напряжений способствует закрытию субмикроскопических пор и трещин, имеющих на поверхности металла, вследствие чего заметно снижается чувствительность деталей к воздействию коррозии.

Усталостная прочность углеродистых сталей может быть повышена термической обработкой на 30-40%. При поверхностной закалке из-за увеличения объема поверхностного слоя в результате образования мартенсита в поверхностных слоях возникают осевые остаточные напряжения сжатия значительной величины. Образованием этих напряжений и упрочнением поверхностного слоя при мартенситном превращении можно объяснить повышение усталостной прочности стали.

Повышение усталостной и коррозионно-усталостной прочности конструкционных металлов можно достичь с помощью диффузионных покрытий, т.е. путем химической и химико-термической обработки. Поверхностный диффузионный слой имеет ряд преимуществ, из которых основными могут быть высокие сжимающие напряжения, повышение поверхностной твердости, явление залечивания дефектов типа трещин и т.п.

*Влияние качества поверхности на коррозионную  
стойкость деталей машин*

При работе деталей машин в различных средах (влажный воздух, вода, смазочные растворы, кислоты, щелочи и т.д.) может происходить их разрушение без их взаимного контактирования. Долговечность таких деталей определяется их коррозионной стойкостью, т.е. способностью металла сопротивляться действию химических и электрохимических процессов. Кроме того, находясь в таких условиях, ряд деталей может испытывать и действие знакопеременных нагрузок. Долговечность таких деталей определяется коррозионно-усталостной прочностью.

Коррозионное разрушение детали начинается с поверхности, которая несет на себе большое количество дефектов в виде царапин, трещин и т.д. Возле этих мест начинается развитие коррозионных процессов и разрушение. Шероховатость поверхности оказывает большое влияние на коррозионную стойкость детали. С уменьшением шероховатости поверхности коррозионная стойкость повышается.

На грубшероховатой поверхности вещества, вызывающие коррозию, осаждаются во впадинах и углублениях, коррозия распространяется в направлении основания гребешков, в результате чего они под воздействием силы трения отрываются от поверхности, образуя новые впадины и выступы, и таким образом появляются новые очаги коррозии и разрушения.

Поверхностный наклеп уменьшает коррозионную стойкость, и наоборот, увеличивает коррозионно-усталостную прочность. При поверхностном наклепе имеет место неоднородная пластическая деформация, приводящая к возникновению разности потенциалов между неодинаково деформированными зернами металла, вследствие этого одни зерна становятся анодами, другие

катодами. Это значительно увеличивает количество коррозионных микроэлементов и ведет к усилению общего процесса коррозии.

Повышение коррозионно-усталостной прочности при наклепе объясняется уплотнением поверхностного слоя и закрытием путей для проникновения активных сред внутрь металла через дефекты поверхности, а также возникновением при наклепе благоприятно действующих остаточных напряжений сжатия. Если при механической обработке в поверхностных слоях появляются растягивающие остаточные напряжения, то при соприкосновении с активной средой возникает коррозионное растрескивание деталей.

*Обеспечение параметров качества поверхности  
технологическими методами*

Параметры качества поверхности зависят от ряда факторов: метода и режимов обработки; геометрических параметров и качества поверхностей режущей части инструмента; пластической и упругой деформации обрабатываемого материала; жесткости технологической системы; характеристики смазочно-охлаждающей жидкости; метода получения заготовки и т.д.

Таким образом, качество поверхности деталей формируется при непосредственном влиянии всего комплекса технологических операций на всех стадиях ее изготовления. В этом случае уместно говорить о существовании так называемой технологической наследственности.

Под технологической наследственностью понимают вли-

яние условий обработки и состояния поверхностного слоя на точность и качество поверхности при последующей или окончательной обработке. Технологической наследственностью называют также изменение эксплуатационных свойств деталей под влиянием технологии их изготовления.

Технологическая наследственность зависит не только от вида и режимов обработки, применяемых на чистовой операции. Она может проявиться в изменении свойств или потере точности формы готовой детали при ее эксплуатации в результате воздействия тех или иных элементов состояния поверхностного слоя, созданных в поверхностном слое детали при ее черновой обработке.

Наибольшее влияние на качество поверхности оказывают финишные операции. На каждый из параметров качества поверхности влияют многие факторы технологического процесса: режимы обработки, режущий инструмент, характеристика обрабатываемой среды и т.п. Существенное влияние на изменение шероховатости, глубину и степень наклепа оказывают различные составы смазочно-охлаждающих жидкостей и поверхностно-активных веществ, вид связки шлифовальных кругов. Качество поверхности зависит также от марки материала обрабатываемой детали и его исходного состояния.

Управляя в процессе изготовления деталей формированием параметров качества поверхности, можно непосредственно влиять на эксплуатационные свойства деталей машин.

Шероховатость поверхности. Все параметры шероховатости, назначенные конструктором, должны быть выполнены в условиях производства. Существуют справочные материалы, в которых приведены интервалы значений параметров шероховатости в зависимости от метода обработки. Данные, приведенные в справочниках, иногда требуют уточнений в зависимости от режимов обработки. Скорость резания  $V$  существенно влияет на шероховатость поверхности (рис.32).

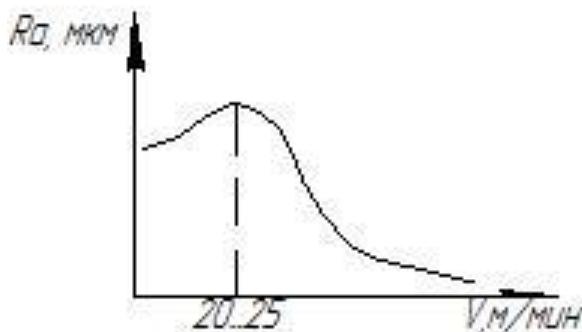


Рис. 32. Зависимость шероховатости поверхности от скорости резания при обработке вязких материалов

При обработке вязких материалов в условиях образования нароста наибольшее значение  $R_a$  наблюдается при скоростях резания 20...25 м/мин. Однако с увеличением скорости резания эффект образования нароста снижается и шероховатость уменьшается.

Подача  $S$  влияет на шероховатость в зависимости от используемого режущего инструмента и условий обработки (рис.33).

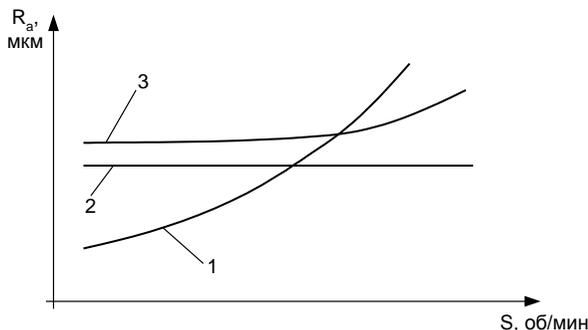


Рис. 33. Зависимость шероховатости поверхности от подачи

При точении стандартными резцами с углом в плане  $45^{\circ}$  и малым радиусом закругления при вершине резца (до 2 мм) подача существенно влияет на шероховатость (кривая 1, рис. 33). Если точение производится резцами с широкой режущей кромкой, установленной параллельно оси изделия, изменение подачи не отражается на шероховатости (кривая 2, рис.33). При сверлении, зенкерования и торцевом и цилиндрическом фрезеровании изменение подачи слабо влияет на шероховатость (кривая 3, рис.33).

Глубина резания мало влияет на шероховатость поверхности. Геометрические параметры режущего инструмента и его состояние оказывают различное влияние на шероховатость (рис.34).

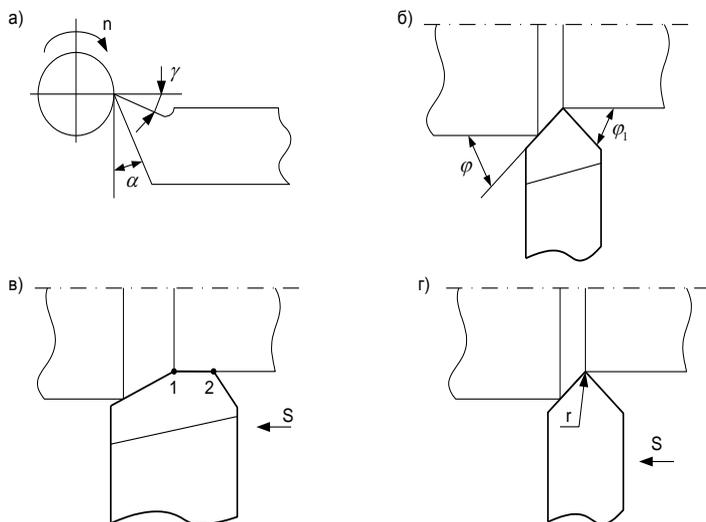


Рис. 34. Геометрические параметры режущего инструмента

При изменении в обычных пределах переднего угла  $\gamma$  и заднего угла  $\alpha$  параметры шероховатости изменяются незначительно (рис.34,а). С уменьшением угла в плане  $\phi$  и вспомогательного угла  $\phi_1$  (рис.34,б) шероховатость заметно уменьшается. На инструментах с широкой режущей кромкой (рис.34,в) обработанной поверхности определяется в основном шероховатостью режущего лезвия на участке 1-2. Этот эффект особенно сильно заметен в начальный период работы инструмента, пока микронеровности лезвия не сгладились. С уменьшением радиуса  $r$  скругления вершины резца шероховатость резко возрастает (рис.34,г).

На шероховатость также оказывает влияние жесткость технологической системы. В местах обработки с меньшей жесткостью шероховатость поверхности выше, чем в местах с большей жесткостью (рис.35).

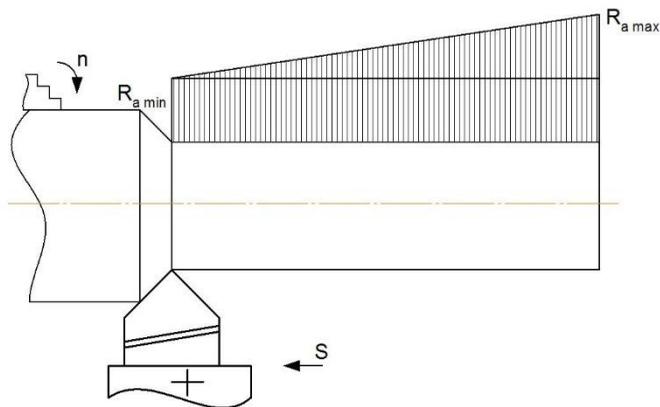


Рис. 35. Влияние жесткости системы на шероховатость поверхности

Из-за действия множества факторов обработки трудно точно оценить шероховатость поверхности. Для её определения пользуются эмпирической формулой при точении:

$$Ra = K_0 \frac{S^{K_1} (90 + \gamma)^{K_4}}{r^{K_2} \cdot V^{K_3}}, \quad (67)$$

где  $K_0, K_1, K_2, K_3, K_4$  – коэффициенты, выбираемые из табл.2;  
 $S$  – подача, 0,05-0,43 мм/об;  $r$  – радиус при вершине резца, 0,5...2 мм;  $V$  – скорость резания, 2,8...71 м/мин;  $\gamma$  – передний угол резца,  $-40^0 \dots 4^0$ .

Таблица 5

Обрабатываемый материал	$K_0$	$K_1$	$K_2$	$K_3$	$K_4$
Ст 3	0,01	0,65	0,6	0,5	1,9
Сталь 20	41,8	0,75	0,55	1,38	0,25

Сталь 45	7,0	0,85	0,65	0,36	0,15
Сталь 70	5,8	1,1	0,68	0,15	0,45

*Физико-механические свойства в поверхностных слоях* деталей всегда отличаются от свойств в сердцевине. Это объясняется особенностями процессов, происходящих при изготовлении заготовок и деталей. Например, поверхности поковок испытывают воздействие штампов, молотов и других частей оборудования, условия охлаждения отливок на поверхности отличаются от условий охлаждения в центре, воздействие режущего инструмента на поверхности и в центре деталей также различно. Часть слоя, расположенная ближе к поверхности, характеризуется раздробленностью кристаллов при изготовлении заготовки, Твердость этого слоя оказывается наиболее высокой, затем она резко снижается и остается постоянной в центральном слое. Высокая твердость частиц металла при раздробленности кристаллов отрицательно характеризует качество поверхностного слоя. В верхнем слое, расположенном ближе к сердцевине, наблюдается упорядоченность расположения отдельных кристаллов от действия инструмента, снижается количество дефектов и т.д.

Поверхностный слой всегда имеет напряжения, отличные от напряжений, возникающих в сердцевине материала детали. Это сказывается на служебных свойствах изделий, таких как выносливость и износ. Величина и знак напряжений поверхностного слоя, определяются методом обработки. Если в результате проведения технологического процесса в слое образовались растягивающие напряжения, то они могут складываться с напряжениями, возникающими в детали при её нагружении в ходе эксплуатации

машины. Это может привести к снижению прочностных свойств и даже к поломке детали. Сжимающие напряжения положительно влияют на служебные свойства деталей (выносливость и износостойкость), поэтому следует отдавать предпочтение методам обработки, способствующим возникновению этих напряжений (например, наклеп при поверхностно пластичном деформировании).

## 5. Припуски на обработку деталей машин

### 5.1. Понятие припуска

*Общим припуском на обработку называется слой материала, удаляемый с поверхности исходной заготовки в процессе механической обработки с целью получения готовой детали.*

Установление правильных размеров припусков на обработку является ответственной технико-экономической задачей. Назначение чрезмерно больших припусков приводит к непроизводительным потерям материала, превращаемого в стружку; к увеличению трудоемкости мех. обработки; к повышению расхода режущего инструмента и электрической энергии; к увеличению потребности в оборудовании и рабочей силы. При этом затрудняется построение операций на настроенных станках, снижается точность обработки в связи с увеличением упругих обжатий

в ТС, и усложняется применение приспособлений.

Назначение недостаточных припусков не обеспечивает удаление дефектных слоев материала и достижения требуемой точности и шероховатости обрабатываемых поверхностей, а также вызывает повышение требований к точности исходных заготовок и приводит к их удорожанию, затрудняет разметку и выверку положения заготовок на станках при обработке по методу пробных ходов и увеличивает опасность появления брака.

*Операционный припуск – это слой материала, удаляемый с заготовки при выполнении одной технологической операции.* Операционный припуск равняется сумме промежуточных припусков, т.е. припусков на отдельные переходы, входящие в данную операцию.

Рассмотрим схему расположения припусков и допусков на обработку вала за две операции (точение и шлифование).

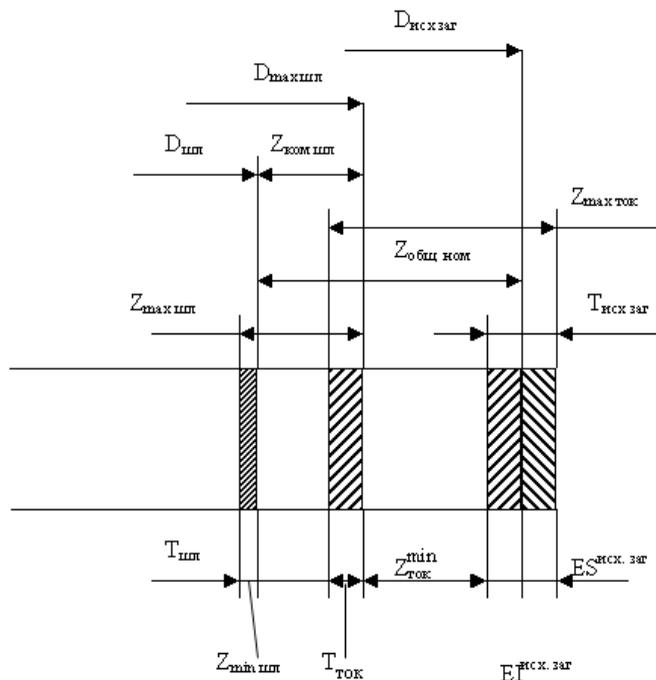


Рис. 36. Схема расположения припусков

$$Z_{ном} = D_{исх.заг} - D_{дет} \quad (68)$$

$$Z_{ном} = \sum_{i=1}^n Z_i \quad (69)$$

где  $Z_i$  ном – номинальный (расчетный) припуск на отдельную операцию;

$n$  – общее число операций обработки детали.

$Z_i^{min}$  – Разность наименьшего предельного размера до обработки и наибольшего предельного размера после обработки на данной операции.

$Z_i^{\max}$  - Разность наибольшего предельного размера до обработки и наименьшего предельного размера после обработки на данной операции.

$$Z_i^{\max} = Z_i^{\min} + TA_{i-1} + TA_i \quad (70)$$

где  $TA_{i-1}$  и  $TA_i$  – допуски для предшествующей и последующей операции или передов.

Допуск припуска – это разность между максимальными и минимальными значениями размера припуска.

Номинальный операционный припуск  $Z_{i \text{ ном}}$  – разность номинальных размеров изделия до и после обработки на данной операции.

$$Z_{i \text{ ном}} = Z_i^{\min} + TA_{i-1} \quad (71)$$

При определении номинального припуска для первой операции обработки заготовки, имеющей симметричное расположение поля допуска, в формулу (4) вводится не все поле допуска, а только его минусовая часть, расположенная «в тело», т.е. нижнее отклонение.

При ориентировочных расчетах можно принять

$$Z_{i \text{ ном}} = (2 \div 4)TA_{i-1} \quad (72)$$

Формулы (4) и (5) показывают, что всякое расширение допусков для предшествующих операций неизбежно вызывает увеличение припуска на обработку для последующих, что обычно ведет к снижению производительности последующих операций. И наоборот, при уменьшении припуска на обработку для данной операции приходится соответственно повышать точность, а следовательно, и стоимость предшествующей обработки.

Наименьший операционный припуск складывается из отдельных элементов, связанных с различными погрешностями.

$$Z_i^{\min} = Z_1 + \sqrt{Z_2^2 + Z_3^2} \quad (73)$$

где  $Z_1$  – слой металла, который надо удалить с заготовки для устранения неровностей после предыдущей обработки и дефектного слоя металла:

$$\text{для тел вращения } Z_1 = 2(R_{Z_{i-1}} + h_{i-1}) \quad (74)$$

при односторонней обработке

$$Z_1 = (R_{Z_{i-1}} + h_{i-1}) \quad (75)$$

$Z_2$  – слой металла, удаляемый для компенсации погрешности формы и пространственных отклонений в расположении обрабатываемых поверхностей относительно базовых поверхностей исходной заготовки.

$Z_3$  – слой металла, удаляемый для компенсации погрешности установки заготовки.

Во всех случаях минимальный припуск не должен быть меньше минимальной толщины стружки, которую может снять режущий инструмент.

Значение составляющих  $R_{Z_{i-1}}$ ,  $h_{i-1}$ ,  $Z_2$  и  $Z_3$  приводятся в справочной литературе, при этом часто используются обозначения:

$$h \rightarrow T; Z_2 \rightarrow \rho; Z_3 \rightarrow \varepsilon$$

Приведенные формулы показывают, что припуск по существу, является компенсатором всех погрешностей предыдущей обработки заготовки и погрешностей, связанных с выполнением данной технологической операции.

Изложенный расчетно-аналитический метод применяется в крупносерийном и массовом производствах. В единичном и серийном производстве часто пользуются нормативными таблицами припусков.

## 5.2. Методы определения величины припуска

Материал и чистая масса детали определяются конструктором. Однако чтобы получить готовую деталь, как правило, нужно сначала изготовить заготовку, которая по размерам и массе всегда больше детали, и уж затем, воздействуя на заготовку несколькими методами обработки, получить готовую деталь. Подавляющее большинство методов обработки реализуется путем съема с заготовки некоторого слоя материала, который называют *припуском* и который уходит в стружку. Поэтому затраты на материал больше, чем стоимость чистой массы деталей.

Поскольку технолог не может изменить ни марку материала, ни конструкцию детали, единственной его возможностью снизить затраты на материал является приближение заготовки по форме и размерам к готовой детали. Эта возможность реализуется при проектировании заготовки. Для этого на каждую подлежащую обработке поверхность технолог назначает припуск и рассчитывает размер заготовки. Например, на рис.37,*а* приведена схема фрезерования плоскости для получения на детали размера  $A_{дет}$  путем съема материала (припуска) толщиной  $z$ . При обработке партии заготовок величина припуска не будет одинакова, так как и размеры заготовки  $A_{заг}$ , и размеры готовых деталей  $A_{дет}$

будут рассеяны по соответствующим полям допусков  $TA_{заг}$  и  $TA_{дет}$ .

Можно различить три разных по величине припуска, показанных на рис.37,б:

*Номинальный припуск* представляет собой разность между номинальными размерами заготовки и готовой детали:

$$z_{i11} = \dot{A}_{\zeta\dot{\alpha}\bar{a}}^{i11} - \dot{A}_{\dot{a}\dot{\alpha}\dot{\delta}}^{i11} . \quad (76)$$

*Минимальный припуск* представляет собой разность между минимальным размером заготовки и максимальным размером готовой детали:

$$z_{\min} = \dot{A}_{\zeta\dot{\alpha}\bar{a}}^{\min} - \dot{A}_{\dot{a}\dot{\alpha}\dot{\delta}}^{\max} . \quad (77)$$

*Максимальный припуск* представляет собой разность между максимальным размером заготовки и минимальным размером готовой детали:

$$z_{\max} = \dot{A}_{\zeta\dot{\alpha}\bar{a}}^{\max} - \dot{A}_{\dot{a}\dot{\alpha}\dot{\delta}}^{\min} . \quad (78)$$

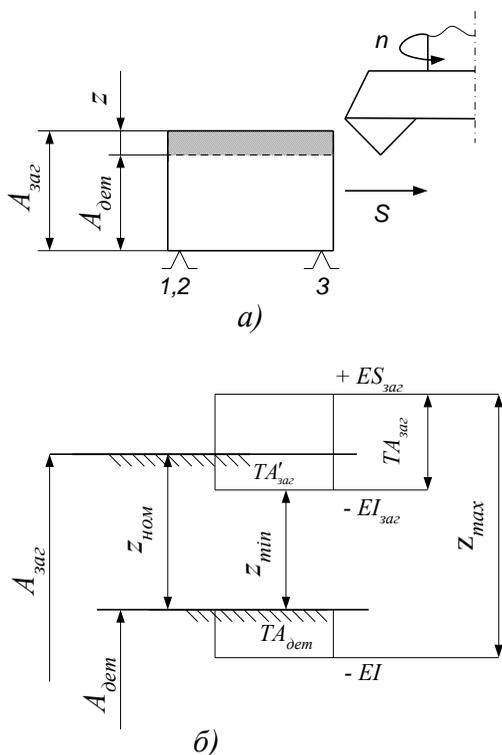


Рис.37. Схема торцевого фрезерования плоскости и расчетная схема для определения охватываемого размера заготовки

Приведенную на рис.37,а схему применяют для расчета размера заготовки с использованием нормативов припуска для различных методов обработки. В этих нормативах приведены рекомендуемые величины номинального припуска. Тогда размер заготовки

$$\dot{A}_{\text{заг}} = (\dot{A}_{\text{дет}}^{iii} + z_{iii})_{-EI_{\text{заг}}}^{+ES_{\text{заг}}} \quad (79)$$

В справочной литературе приводятся два вида нормативных значений припусков – *общие* и *межпереходные*.

*Общие припуски* не учитывают состава переходов в плане

обработки поверхности и не зависят от их количества. Поэтому их величина рассчитана на тот наихудший случай, когда разрабатывается только маршрутный техпроцесс, а состав переходов в плане обработки поверхности и распределение общего припуска отдается на откуп квалифицированному рабочему. Такие ситуации характерны для единичного и мелкосерийного производств и в этих случаях размер заготовки определяют по формуле (79). Допуск на размер заготовки и отклонения  $ES_{зар}$  и  $EI_{зар}$  зависят от вида и метода ее получения и оговорены соответствующими стандартами на точность заготовок.

**Межпереходные припуски.** Если же план обработки поверхности разработан, то рассчитывается размер заготовки для каждого технологического перехода с использованием нормативных величин номинальных припусков для различных методов обработки, а общий припуск определяется суммой промежуточных (межпереходных) припусков.

В этих случаях для определения размера заготовки на каждом технологическом переходе используются расчетные схемы, аналогичные приведенной на рис.37,б. Расчетная схема для определения размера заготовки для обработки плоскости на трех технологических переходах приведена на рис.38.

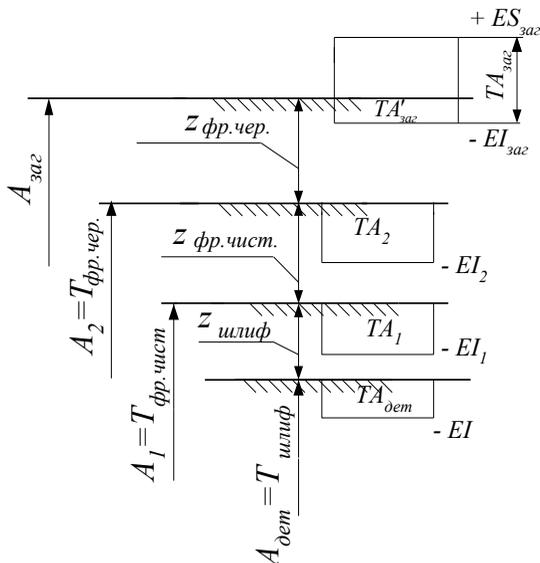


Рис.38. Расчетная схема для определения межпереходных технологических размеров и размера заготовки для обработки плоскости на трех технологических переходах по схеме рис.37, а с использованием табличных значений номинальных промежуточных припусков

Эта схема продолжает пример обработки плоскости, приведенный на рис.37, а, но план обработки ее состоит из трех технологических переходов: фрезерование черновое, фрезерование чистовое и шлифование.

Согласно этой схеме размер заготовки для шлифования, получаемый после чистового фрезерования, равен

$$\dot{A}_1 = \dot{O}_{\text{фр.чист.}} = (\dot{A}_{\text{фр.чер.}} + z_{\text{фр.чист.}})_{-EI_1} \quad (80)$$

Размер заготовки для чистового фрезерования, получаемый после чернового фрезерования, равен

$$\dot{A}_2 = \dot{O}_{\text{фр.чер.}} = (\dot{A}_{\text{фр.чер.}} + z_{\text{фр.чер.}} + z_{\text{фр.чист.}})_{-EI_2} \quad (81)$$

Размер заготовки

$$\dot{A}_{\zeta\delta\bar{a}} = (\dot{A}_{\bar{a}\delta\delta} + z_{\phi \bar{e}\bar{e}\delta} + z_{\delta \delta \cdot \bar{e}\bar{n}\delta} + z_{\delta \delta \cdot \bar{a}\delta})_{-EI_{\zeta\delta\bar{a}}}^{+ES_{\zeta\delta\bar{a}}}, \quad (82)$$

где  $z_{\phi \bar{e}\bar{e}\delta} + z_{\delta \delta \cdot \bar{e}\bar{n}\delta} + z_{\delta \delta \cdot \bar{a}\delta} = z_{r \bar{a}\bar{u}}.$

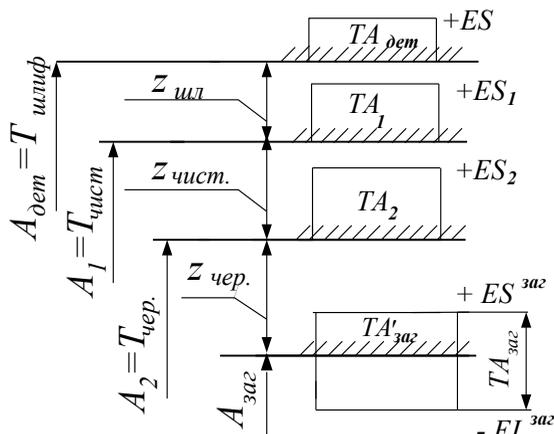


Рис.39. Схема расчета межпереходных технологических размеров и размера заготовки при обработке внутренней осесимметричной поверхности (отверстия)

Расчетная схема на рис.38 и формулы (80)-(82) можно использовать и для случая обработки охватываемой осесимметричной поверхности (например, вала). При многопереходной обработке охватывающей поверхности (отверстия) используется расчетная схема на рис.39. На этой схеме отверстие обрабатывается на трех технологических переходах – черновом и чистовом растачивании и шлифовании. Согласно этой схеме

$$\dot{A}_1 = \dot{D}_{\bar{e}\bar{n}\delta} = (\dot{A}_{\bar{a}\delta\delta} - z_{\phi \bar{e}\bar{e}\delta})^{+ES_1}; \quad (83)$$

$$\dot{A}_2 = \dot{D}_{\bar{a}\delta} = (\dot{A}_{\bar{a}\delta\delta} - z_{\phi \bar{e}\bar{e}\delta} - z_{\bar{e}\bar{n}\delta})^{+ES_2}; \quad (84)$$

$$\dot{A}_{\zeta\delta\bar{a}} = (\dot{A}_{\bar{a}\delta\delta} - z_{\phi \bar{e}\bar{e}\delta} - z_{\bar{e}\bar{n}\delta} - z_{\bar{a}\delta})_{-EI_{\zeta\delta\bar{a}}}^{+ES_{\zeta\delta\bar{a}}}. \quad (85)$$

Формулы (83)–(85) позволяют с использованием справоч-

ных величин припусков быстро и с небольшой трудоемкостью рассчитать размеры заготовки. Такой способ называют проектированием заготовки по укрупненным нормативам. Однако этот способ не позволяет выявить возможные пути и меры для уменьшения припусков в каждом конкретном случае, его использование переносит прошлый опыт, зафиксированный в рекомендуемых справочными нормативами общих и межпереходных припусках, в настоящее и будущее, другими словами, он не стимулирует использование передовых достижений науки и практики.

Рекомендуемые справочниками припуски ориентированы на самый наихудший случай, и для большинства конкретных случаев такой припуск больше необходимого. Это означает, что рассчитанная с их использованием заготовка будет иметь излишнюю массу.

Завышенные припуски позволяют достичь требуемой точности размера готовой детали, но приводят к дополнительным расходам как на материал для изготовления детали, так и дополнительным затратам на их удаление, т.е. на превращение этих припусков в стружку. Поэтому такие расчеты заготовок применяются в единичном и серийном производствах при небольших партиях.

В крупносерийном и массовом производствах применяют расчетно-аналитический способ определения размеров заготовки. Этот способ предполагает:

- использование в расчетах минимального припуска вместо номинального;
- аналитический расчет минимального припуска для каждого технологического перехода;

- обязательный расчет межпереходных (технологических) размеров для всех переходов в плане обработки поверхности;
- использование расчетных схем для определения размера заготовки, учитывающих конкретные условия обработки и наши знания о формировании погрешности технологического размера.

Расчетно-аналитический метод применяют для поверхностей детали, определяющих ее металлоемкость. Он позволяет уменьшить массу заготовки, значительно повысить коэффициент использования металла и, как следствие, снизить технологическую себестоимость детали как за счет сокращения затрат на материал, так и за счет сокращения других затрат, зависящих от объема удаляемого с заготовки металла на всем технологическом процессе ее изготовления.

***Аналитический расчет минимально необходимого припуска.*** Теоретической целью любого метода обработки является удаление (уничтожение) погрешностей заготовки, т.е. погрешностей предыдущего метода обработки. Реально же любой метод обработки, удаляя погрешности предыдущей обработки, сопровождается формированием аналогичных погрешностей, но уменьшенных в  $\varepsilon_\gamma$  раз. Это явление называют технологической наследственностью. Напомним себе, что размерное описание поверхности состоит из ее размера с допуском, допуска на макрогеометрические отклонения формы и допуска микрогеометрических отклонений формы (шероховатости). Кроме геометрической точности качество поверхности включает измененные характеристики поверхностного слоя материала. Таким образом, для определения величины минимального припуска необходимо выявить

те погрешности предыдущей обработки, которые должны быть удалены в результате обработки на технологическом переходе.

Для анализа этих погрешностей обратимся к схеме фрезерования плоскости на рис.37. Представим себе ту реальную поверхность заготовки (возможно, заготовка – штамповка или отливка), которая будет уничтожена в результате обработки и вместо которой на детали появится обработанная поверхность. Конечно же, она шероховата и ее шероховатость характеризуется по стандарту средней высотой  $Rz$  или среднеарифметическим отклонением  $Ra$ . Для того чтобы на обработанной поверхности не осталось следов предыдущей обработки, необходимо удалить максимальную по высоте шероховатость, как это показано на рис.40, и, следовательно, припуск не может быть меньше этой величины. В расчетах можно принять  $R_{max} \approx 1,2Rz \approx 4Ra$ .

Под этой шероховатой поверхностью залегает слой материала с измененными свойствами (возможно изменение химического состава, фазового состава, структуры, твердости и т.д.), как это показано на рис.40. В материале готовой детали эти изменения чаще всего не нужны, их надо удалить вместе со слоем  $T_{i-1}$ . Это вторая составляющая минимального припуска.

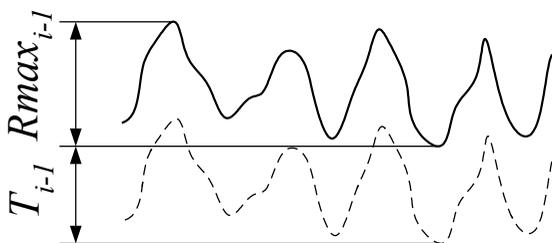


Рис.40. Схема поверхностного слоя материала поверхности заготовки

Первые две составляющие минимального припуска обусловлены технологическими возможностями того метода обработки, который был использован на предыдущем  $(i-1)$ -ом переходе поверхности, подлежащей обработке на  $i$ -ом переходе, для которого рассчитывается припуск. Но на предыдущем переходе сформировалась и погрешность положения подлежащей обработке поверхности относительно той технологической базы, которая будет использована на  $i$ -ом переходе. Поэтому третьей составляющей минимального припуска является пространственная погрешность положения  $\rho_{i-1}$  подлежащей обработке поверхности относительно используемой технологической базы на  $i$ -ом переходе в направлении получаемого размера. В примере на рис.37 эта погрешность равна той части допуска размера заготовки  $\Delta A'_{\text{св}}$ , в которой содержатся отклонения размера, направленные в тело детали. Если эту часть допуска не включить в минимальный припуск, то на заготовке с минимальным размером останутся и шероховатость, и дефектный слой материала заготовки, чего допустить нельзя. Другие примеры определения величины  $\rho_{i-1}$  приведены на рис.41.

При обтачивании заготовки, установленной на центровые отверстия, ось подлежащей обработке поверхности может не совпадать с осью центровых отверстий (двойной направляющей базой) по двум причинам: во-первых, из-за эксцентричной зацентровки заготовки на предыдущей операции и, во-вторых, из-за

прогиба оси заготовки по различным причинам. Это несовпадение можно оценить величиной  $\Delta$ , как показано на рис.41, а. Минимальный припуск на радиус должен быть больше  $\rho = \Delta$ , в противном случае на обработанной поверхности могут остаться следы предыдущей обработки, что недопустимо.

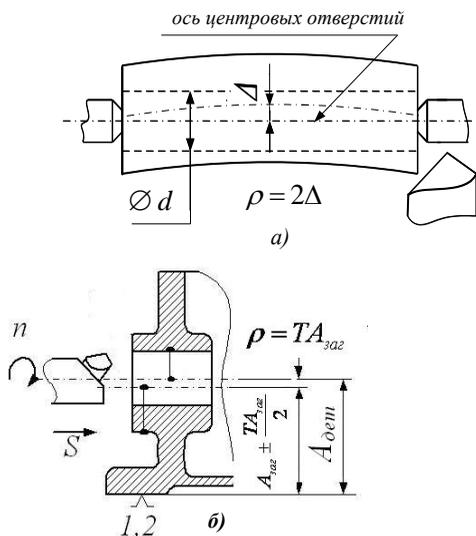


Рис.41. Примеры определения величины  $\rho_{i-1}$

При растачивании отверстия в корпусе по схеме на рис.41, б положение оси отверстия в партии заготовок (отливок) относительно установочной базы в направлении технологического размера  $A_{дет}$  будет рассеяно по полю допуска размера в заготовке, приходящей с предыдущей операции (фрезерование плоскости установочной базы). Чтобы у некоторых обработанных деталей на поверхности отверстий не осталось следов предыдущей обработки, минимальный припуск на диаметр должен быть, как минимум, не меньше  $\rho_{i-1} = TA_{заг}$ .

Наконец, при установке заготовок в технологическую систему на  $i$ -ом переходе положение технологической базы в направлении технологического размера получает рассеяние по полю, называемому погрешностью установки  $\omega_y$  (расчет этой погрешности см. в [19]). Естественно, что и подлежащая обработке поверхность заготовки в партии получает то же самое рассеяние и его надо учесть в минимальном припуске для того, чтобы на обработанной поверхности некоторых деталей не осталось следов предыдущей обработки.

В результате проведенного анализа минимальный припуск в общем случае может быть рассчитан по следующей формуле:

$$z_{\min} = R \max_{i-1} + T_{i-1} + \rho_{i-1} + \omega_{yi}. \quad (86)$$

Используя эту общую формулу, можно получить формулу для каждого конкретного случая. По формуле (86) рассчитывается припуск на отдельно обрабатываемую плоскость (см.рис.37,а).

Если две связанные между собой плоскости обрабатываются одновременно двумя инструментами, как показано на рис.2.6, то суммарный минимальный припуск на эти две поверхности будет

$$z_{\min} = 2(R \max_{i-1} + T_{i-1} + \rho_{i-1} + \omega_{yi}). \quad (87)$$

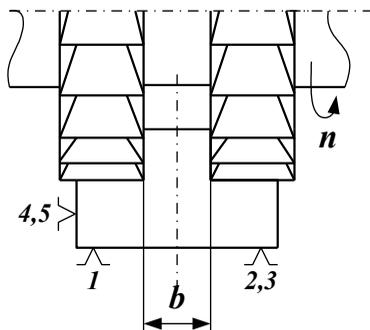


Рис.42. Схема обработки двух плоскостей набором дисковых фрез на горизонтально-фрезерном станке

При обработке осесимметричной поверхности (цилиндрической, конической и т.д.) с вращением детали  $\rho_{i-1}$  и  $\omega_y$  получают векторную направленность с чрезвычайно малой вероятностью совпадения их направлений, поэтому их следует суммировать между собой по правилу квадратного корня. В результате получаем формулу минимального припуска на диаметр:

$$z_{\min} = 2(R \max_{i-1} + T_{i-1} + \sqrt{\rho_{i-1}^2 + \omega_{yi}^2}). \quad (88)$$

При обработке поверхности цилиндрического отверстия протяжкой или плавающей разверткой заготовка базируется по ранее обработанному отверстию, поэтому в данном случае  $\rho_{i-1}=0$  и  $\omega_y=0$ , и минимальный припуск на диаметр равен

$$z_{\min} = 2(R \max_{i-1} + T_{i-1}). \quad (89)$$

При суперфинише или полировании цилиндрической поверхности, когда в результате обработки только уменьшается высота шероховатостей в пределах уже достигнутой ранее точности ее размера, минимальный припуск на диаметр будет равен

$$z_{\min} = 2R \max_{i-1}. \quad (90)$$

При шлифовании поверхностно закаленной поверхности детали, когда после обработки необходимо максимально сохранить закаленный слой материала, в формулах (2.11), (2.13) следует принять  $T_{i-1} = 0$ , и формулы примут вид:

$$z_{\min} = R \max_{i-1} + \rho_{i-1} + \omega_{yi}; \quad (91)$$

$$z_{\min} = 2(R \max_{i-1} + \sqrt{\rho_{i-1}^2 + \omega_{yi}^2}). \quad (92)$$

**Расчет межпереходных размеров и размера заготовки с использованием минимального припуска.** При использовании рассчитанных для каждого технологического перехода минимальных припусках схема для расчета межпереходных размеров и размера заготовки, приведенная на рис.37, трансформируется в схему на рис.43:

– размер заготовки для шлифования, получаемый после чистового фрезерования

$$\dot{A}_1 = \dot{O}_{\delta \delta, \dot{\epsilon} \dot{\eta} \dot{\delta}} = (\dot{A}_{\dot{a} \dot{a} \dot{\delta}} + z_{\min \delta \dot{\epsilon}, \dot{\epsilon} \dot{\eta}} + TA_1)_{-EI_1}; \quad (93)$$

– размер заготовки для чистового фрезерования, получаемый после чернового фрезерования

$$\dot{A}_2 = \dot{O}_{\delta \delta, \dot{\epsilon} \dot{\delta}} = (\dot{A}_1 + z_{\min \delta \delta, \dot{\epsilon} \dot{\eta}} + TA_2)_{-EI_2},$$

или

$$\dot{A}_2 = \dot{O}_{\delta \delta, \dot{\epsilon} \dot{\delta}} = (\dot{A}_{\dot{a} \dot{a} \dot{\delta}} + z_{\min \delta \delta, \dot{\epsilon} \dot{\delta}} + z_{\min \delta \delta, \dot{\epsilon} \dot{\eta} \dot{\delta}} + TA_2)_{-EI_2}; \quad (94)$$

– размер заготовки для чернового фрезерования, получаемый после штамповки (отливки)

$$\dot{A}_{\dot{\zeta} \dot{a} \dot{a}} = (\dot{A}_2 + z_{\min \delta \delta, \dot{\epsilon} \dot{\delta}} + TA'_{\dot{\zeta} \dot{a} \dot{a}})_{-EI_{\dot{\zeta} \dot{a} \dot{a}}}^{+ES_{\dot{\zeta} \dot{a} \dot{a}}},$$

или

$$\dot{A}_{\dot{\zeta} \dot{a} \dot{a}} = (\dot{A}_{\dot{a} \dot{a} \dot{\delta}} + z_{\min \delta \dot{\epsilon}} + z_{\min \delta \delta, \dot{\epsilon} \dot{\eta} \dot{\delta}} + z_{\min \delta \delta, \dot{\epsilon} \dot{\delta}} + TA_1 + TA_2 + \dot{O}'_{\dot{\zeta} \dot{a} \dot{a}})_{-EI_{\dot{\zeta} \dot{a} \dot{a}}}^{+ES_{\dot{\zeta} \dot{a} \dot{a}}}$$

Или в общем виде

$$\dot{A}_{\zeta\alpha\bar{a}} = (\dot{A}_{\alpha\bar{a}\bar{a}} + \sum_{i=1}^k z_{\min i} + TA_1 + TA_2 + \dot{O}_{\zeta\alpha\bar{a}}') \cdot \frac{+ES_{\zeta\alpha\bar{a}}}{-EI_{\zeta\alpha\bar{a}}}. \quad (95)$$

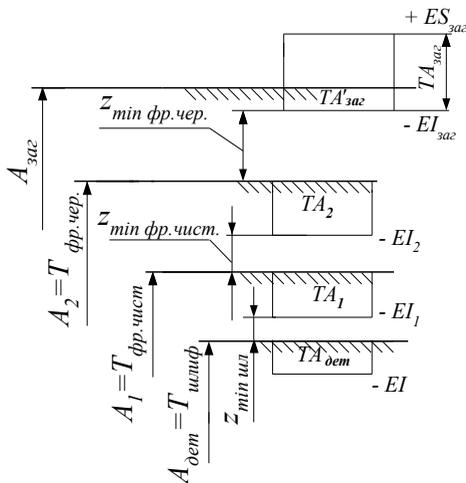


Рис.43. Расчетная схема для определения размера заготовки с использованием минимальных припусков (охватываемый размер детали)

Схема для расчета межпереходных технологических размеров и размера заготовки при обработке внутренней осесимметричной поверхности (отверстия) с использованием минимальных припусков приведена на рис.43. На этой схеме отверстие обрабатывается аналогично схеме на рис.38 на трех технологических переходах. Согласно этой схеме:

– размер заготовки для шлифования, получаемый после чистовой обработки

$$\dot{A}_1 = \dot{O}_{-\bar{e}\bar{n}\bar{o}} = (\dot{A}_{\alpha\bar{a}\bar{a}} - z_{\min \phi \bar{e}} - TA_1)^{+ES_1}; \quad (96)$$

– размер заготовки для чистовой обработки, получаемый

после черновой обработки

$$\dot{A}_2 = \dot{O}_{\text{ч.д.}} = (\dot{A}_1 - z_{\min \text{ч.д.}} - TA_2)^{+ES_2},$$

или

$$\dot{A}_2 = \dot{O}_{\text{ч.д.}} = (\dot{A}_{\text{уд.д.}} - z_{\min \text{ч.д.}} - z_{\min \text{ч.д.}} - TA_2)^{+ES_2}; \quad (97)$$

– размер заготовки для черновой обработки, получаемый после штамповки (отливки)

$$\dot{A}_{\text{сд.д.}} = (\dot{A}_2 - z_{\min \text{д.д.}} + TA'_{\text{сд.д.}})^{+ES_{\text{сд.д.}}}_{-EI_{\text{сд.д.}}},$$

или

$$\dot{A}_{\text{сд.д.}} = (\dot{A}_{\text{уд.д.}} - z_{\min \text{д.д.}} - z_{\min \text{д.д.}} - z_{\min \text{д.д.}} - TA_1 - TA_2 - \dot{O}'_{\text{сд.д.}})^{+ES_{\text{сд.д.}}}_{-EI_{\text{сд.д.}}}$$

Или в общем виде

$$\dot{A}_{\text{сд.д.}} = (\dot{A}_{\text{уд.д.}} - \sum_{i=1}^k z_{\min i} - TA_1 - TA_2 - \dot{O}'_{\text{сд.д.}})^{+ES_{\text{сд.д.}}}_{-EI_{\text{сд.д.}}}. \quad (98)$$

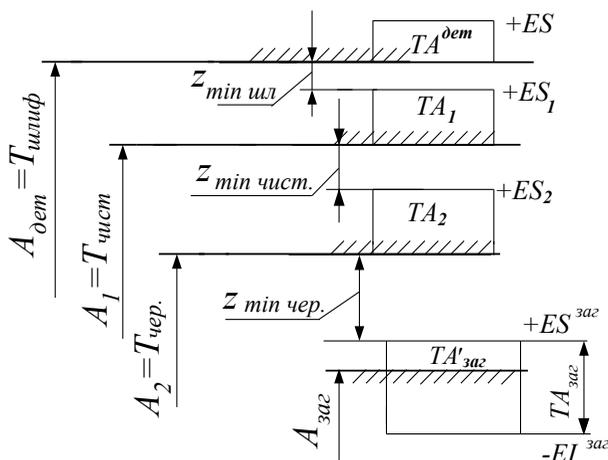


Рис.44. Расчетная схема для определения размера отверстия в заготовке с использованием минимальных припусков (охватывающий размер детали)

Рассчитанный по формуле (98) размер заготовки окажется существенно меньше рассчитанного для той же поверхности по формуле (85) за счет уменьшения суммы минимальных припусков при одинаковых значениях  $TA_1$ ,  $TA_2$  и  $\Delta'_{\text{заб}}$ . В этом и состоит эффект расчетов минимальных припусков.

Есть еще одна возможность для уменьшения размера заготовки. Расчетная схема на рис. 44 построена из предположения, что из заготовки с любым размером в пределах допуска  $TA_{\text{зар}}$  можно получить деталь любого размера в пределах допуска  $TA_{\text{дет}}$ . Это означает, что из заготовки с максимальным размером можно получить деталь с минимальным размером и наоборот. Наши знания о жесткости технологических систем и возникающих по этой причине упругих перемещениях позволяют утверждать, что это далеко не всегда так. При обработке на настроенных станках заготовки с максимальным размером, а следовательно, и с максимальным припуском, величина упругих перемещений в технологической системе будет максимальной. Это означает, что из заготовки с максимальным размером никогда не получится деталь с минимальным размером. Закон копирования погрешностей утверждает, что в этом случае и обработанная деталь будет иметь максимальный размер. А раз это так, то нет смысла на расчетной схеме откладывать минимальный припуск от верхней границы поля допуска размера детали, логично отложить его от нижней границы поля допуска размера детали (для охватываемого размера (см. рис.37)), как это показано на рис.45. Размер заготовки согласно этой схеме равен

$$\Delta'_{\text{заб}} = (\Delta_{\text{заб}} - \Delta_{\text{заб}} + z_{\text{min}} + TA'_{\text{заб}})^{+ES}_{-EI} \quad (99)$$

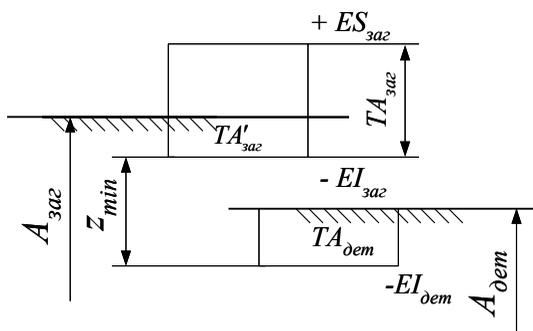


Рис.45. Расчетная схема для определения размера заготовки с учетом закона копирования погрешностей (охватываемый размер детали)

Закон копирования погрешностей проявляет себя на черновых и получистовых переходах. На чистовых и отделочных переходах, где припуски малы, а следовательно, малы и силы резания, а жесткость технологических систем велика, риск иметь недостаточный припуск при использовании расчетной схемы на рис.43 оказывается большим.

Поэтому для расчета размера заготовки при плане обработки поверхности из нескольких технологических переходов применяют комбинированные расчетные схемы вместо схем на рис.43 и 44. На рис.46 приведены примеры таких схем для обработки наружной и внутренней поверхностей последовательно на трех технологических переходах.

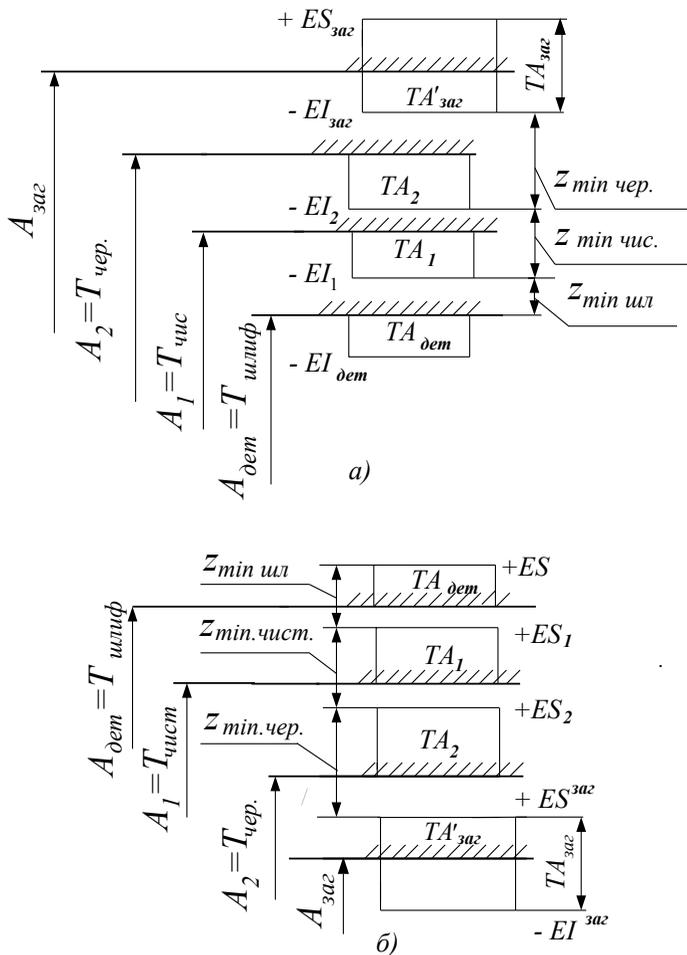


Рис.46. Комбинированные схемы для расчета размера заготовки при обработке на трех технологических переходах: *а* - вала; *б* - отверстия

При такой схеме:

- для обработки вала

$$\dot{A}_1 = \dot{O}_{\dot{z}_{\min \phi \ddot{e}}} = (\dot{A}_{\dot{a} \dot{d} \dot{o}} - TA_{\dot{a} \dot{d} \dot{o}} + z_{\min \phi \ddot{e}} + TA_1)_{-EI_1}; \quad (100)$$

$$\begin{aligned} \dot{A}_2 = \dot{O}_{\dot{z}\dot{\epsilon}\dot{\eta}\dot{\delta}} &= (\dot{A}_1 - \dot{O}\dot{A}_1 + z_{\min \dot{z}\dot{\epsilon}\dot{\eta}\dot{\delta}} + TA_2)_{-EI_2} = \\ &= (\dot{A}_{\dot{a}\dot{\delta}\dot{o}} + z_{\min \phi \dot{\epsilon}} + z_{\min \dot{z}\dot{\epsilon}\dot{\eta}\dot{\delta}} + TA_2)_{-EI_2}; \end{aligned} \quad (101)$$

$$\begin{aligned} \dot{A}_{\zeta\dot{a}\dot{a}} &= (\dot{A}_2 - \dot{O}\dot{A}_2 + z_{\min \dot{z}\dot{\delta}} + TA'_{\zeta\dot{a}\dot{a}})_{-EI_{\zeta\dot{a}\dot{a}}}^{+ES_{\zeta\dot{a}\dot{a}}} = \\ &= (\dot{A}_{\dot{a}\dot{\delta}\dot{o}} + z_{\min \phi \dot{\epsilon}} + z_{\min \dot{z}\dot{\epsilon}\dot{\eta}\dot{\delta}} + z_{\min \dot{z}\dot{\delta}} + TA'_{\zeta\dot{a}\dot{a}})_{-EI_{\zeta\dot{a}\dot{a}}}^{+ES_{\zeta\dot{a}\dot{a}}}. \end{aligned}$$

Или

$$\dot{A}_{\zeta\dot{a}\dot{a}} = (\dot{A}_{\dot{a}\dot{\delta}\dot{o}} + \sum_{i=1}^k z_{\min i} + TA'_{\zeta\dot{a}\dot{a}})_{-EI_{\zeta\dot{a}\dot{a}}}^{+ES_{\zeta\dot{a}\dot{a}}}. \quad (102)$$

- для обработки отверстия

$$\dot{A}_1 = \dot{O}_{\dot{z}\dot{\epsilon}\dot{\eta}\dot{\delta}} = (\dot{A}_{\dot{a}\dot{\delta}\dot{o}} + TA_{\dot{a}\dot{\delta}\dot{o}} - z_{\min \phi \dot{\epsilon}} - TA_1)_{-EI_1}^{+ES_1}; \quad (103)$$

$$\begin{aligned} \dot{A}_2 = \dot{O}_{\dot{z}\dot{\delta}\dot{o}} &= (\dot{A}_1 + \dot{O}\dot{A}_1 - z_{\min \dot{z}\dot{\epsilon}\dot{\eta}\dot{\delta}} + TA_2)_{-EI_2}^{+ES_2} = \\ &= (\dot{A}_{\dot{a}\dot{\delta}\dot{o}} - z_{\min \phi \dot{\epsilon}} - z_{\min \dot{z}\dot{\epsilon}\dot{\eta}\dot{\delta}} + TA_2)_{-EI_2}^{+ES_2}; \end{aligned} \quad (104)$$

$$\begin{aligned} \dot{A}_{\zeta\dot{a}\dot{a}} &= (\dot{A}_2 + \dot{O}\dot{A}_2 - z_{\min \dot{z}\dot{\delta}} + TA'_{\zeta\dot{a}\dot{a}})_{-EI_{\zeta\dot{a}\dot{a}}}^{+ES_{\zeta\dot{a}\dot{a}}} = \\ &= (\dot{A}_{\dot{a}\dot{\delta}\dot{o}} - z_{\min \phi \dot{\epsilon}} - z_{\min \dot{z}\dot{\epsilon}\dot{\eta}\dot{\delta}} - z_{\min \dot{z}\dot{\delta}} + TA'_{\zeta\dot{a}\dot{a}})_{-EI_{\zeta\dot{a}\dot{a}}}^{+ES_{\zeta\dot{a}\dot{a}}}. \end{aligned} \quad (105)$$

Сравнение формул (105) и (98) показывает эффективность комбинированной схемы расчета размера заготовки.

## 6. Повышение производительности труда изготовления машины и деталей пищевого производства

### **6.1. Техничко-экономические показатели изготовления изделий в машиностроении**

**Техническое нормирование** в широком смысле этого понятия представляет собой установление технически обоснованных норм расхода производственных ресурсов. При этом под **производственными ресурсами** понимаются энергия, сырье, материалы, инструмент, рабочее время и т.д.

В современных условиях механосборочного производства экономия производственных ресурсов приобретает чрезвычайно важное значение. Особенно важной задачей, решаемой при проектировании ТП, является задача технического нормирования рабочего времени, т.е. нормирование труда. Оно осуществляется методами технического нормирования и опытно-статистическим методом.

**Техническое нормирование труда** – это совокупность методов и приемов по выявлению резервов рабочего времени и установлению необходимой сметы труда.

Задачами технического нормирования являются выявление резервов рабочего времени и улучшение организации труда на предприятии, установление норм времени и в конечном счете – повышение производительности труда и увеличение объема производства.

При техническом нормировании труда (т.е. при аналитическом определении нормы времени) технологическая операция разлагается на элементы машинные, машинно-ручные и ручные, на переходы, ходы, приемы и движения. При этом каждый эле-

мент подвергается анализу как в отдельности, так и в сочетании со сменными элементами. Перед расчетом норм времени производится анализ структуры операции с целью ее улучшения.

Нормы времени, определенные аналитическим методом, называются технически обоснованными нормами или просто техническими нормами.

Технически обоснованная норма времени – это время необходимое для выполнения единицы работы, установленное расчетом исходя из рационального использования в данных условиях производства труда рабочего (живого труда) и орудий труда (овеществленного труда) с учетом передового производственного опыта.

Назначение технической нормы времени не ограничивается определением оплаты за труд и его производительности. Она служит основой для определения требуемого количества и загрузки оборудования, производственной мощности участков и цехов, расчета основных показателей по труду и заработной плате, а также основой календарного (оперативного) планирования.

С развитием техники и технологии нормы времени должны корректироваться в сторону их снижения с учетом растущей производительности труда.

**Опытно-статистический метод нормирования** – применяется в условиях единичного и мелкосерийного производства, не предназначен для аналитического расчета трудоемкости выполняемой работы. Норма времени устанавливается на всю операцию в целом путем сравнения с нормами и фактической трудоемкостью выполнения в прошлом аналогичной работы.

В условиях единичного и мелкосерийного производства эко-

номически нецелесообразно расчленять операции на дифференцированные элементы для определения норм времени.

Затраты рабочего времени в течение рабочего дня (за исключением обеденного перерыва) подразделяются на нормируемые и ненормируемые затраты.

К нормируемым относятся затраты необходимые для выполнения заданной работы, и потому подлежащие включению в состав нормы времени.

К ненормируемым затратам относятся затраты которые не включаются в состав нормы времени, к ним относятся потери рабочего времени по организационным и техническим причинам.

Нормируемые затраты рабочего времени делятся на:

- подготовительно-заключительное время,  $T_{пз}$ ;
- оперативное время,  $T_{оп}$ ;
- время обслуживания рабочего места,  $T_{обс.}$ ;
- время перерывов на отдых и личные потребности рабочего,  $T_{отд.}$

Норма подготовительно заключительного времени  $T_{пз}$  – это норма времени на подготовку рабочих и средств производства к выполнению механической операции и приведение их в первоначальное состояние после ее окончания.

$T_{пз}$  включает в себя:

- получение материалов, инструментов, приспособлений, технической документации и наряда на работу;
- ознакомление с работой, технологической документацией, чертежом, получение инструмента;
- установку инструментов, приспособлений, наладку оборудования на соответствующий режим работы;

- снятие приспособлений и инструмента;
- сдачу готовой продукции, остатков материалов, приспособлений, инструмента, технологической документации, наряда.

Тпз затрачивается один раз на всю партию обрабатываемых изделий и рассчитывается по нормативам.

Норма оперативного времени  $T_{оп}$  – это норма времени на выполнение технологической операции, состоящая из суммы норм основного времени  $T_o$  и неперекрываемого им вспомогательного времени:

$$T_{оп} = T_o + T_v \quad (106)$$

Основное время  $T_o$  – это норма времени на достижение непосредственной цели данной технологической операции или перехода по качественному или количественному изменению предмета труда (изменение размеров и формы, внешнего вида и состояния поверхности, взаимного расположения частей сборочной единицы и их крепление, и т.д.)

Основное время  $T_o$  может быть:

- машинным;
- машинно-ручным;
- ручным;
- аппаратурным.

$$T_o = L_{обр} / S_{мин} = (L_1 + L_2 + L) / S_{мин} \quad , \quad (107)$$

где  $L$  – величина хода инструмента непосредственно с резанием металла;

$L_1$  – врезание;

$L_2$  – перебег.

Вспомогательное время  $T_v$  представляет собой норму времени на осуществление действий, создающих возможность вы-

полнения основной работы, являющейся целью технологической операции или перехода, и повторяющихся с каждым изделием или через определенное их число (установка и снятие изделия, пуск и выключение станка, подвод и отвод инструмента, перемещение стола или суппорта, промеры изделия, смена инструмента или его переустановка).

Вспомогательное время  $T_v$  определяется по таблицам нормативов и бывает:

- ручным;
- механизированным.

Время обслуживания рабочего места  $T_{обс}$  – представляет собой часть штучного времени, затрачиваемую исполнителем на поддержание средств технологического оснащения в работоспособном состоянии и ухода за ними и рабочим местом.

Время на личные потребности  $T_{отд}$  – это часть штучного времени, затрачиваемая человеком на личные потребности и дополнительный отдых (обычно не выше 2% от продолжительности рабочей смены).

Норма времени – это регламентированное время выполнения некоторого объема работ в определенных производственных условиях одним или несколькими исполнителями соответствующей квалификацией (ГОСТ).

$$T_{ш-к} = T_{ш} + T_{пз}/n \quad , \quad (108)$$

где  $T_{ш-к}$  – норма штучно-калькуляционного времени;

$T_{пз}$  – норма подготовительно-заключительного времени;

$n$  – количество заготовок в обрабатываемой партии.

Норма штучного времени – это норма времени на выполнение объема работы, равной единице нормирования.

$$T_{\text{ш}} = T_{\text{о}} + T_{\text{в}} + T_{\text{обс}} + T_{\text{отд}} = T_{\text{оп}} + T_{\text{обс}} + T_{\text{отд}} \quad (109)$$

## 6.2. Конструкторские пути повышения производительности труда – улучшение технологичности конструкции машин и деталей

**Технологичность конструкции изделия** (ТКИ) – это совокупность свойств конструкции изделия, проявляемых в возможности оптимальных затрат при конструкторской и технологической подготовке производства, при изготовлении, ремонте и эксплуатации изделия.

В соответствии с возможными областями проявления тех или иных свойств, составляющих технологичность конструкции изделия, следует различать два вида технологичности: производственную и эксплуатационную.

**Производственная технологичность** проявляется в сокращении затрат средств и времени на конструкторскую и технологическую подготовку производства, а также на изготовление изделия. **Эксплуатационная технологичность** проявляется при техническом обслуживании и ремонте машины в сфере эксплуатации.

Главная особенность при отработке изделия на технологичность состоит в определяющей роли технологии машиностроения, которая заключается в подчинении конструктивных решений

требованиям рациональных технологических процессов изготовления и сборки. Осуществляется это с помощью технологических требований. Технологические требования, предъявляемые к машинам, определяют условия их рационального производства. Выполнение этих требований ведет к созданию технологичных конструкций. Технологические требования зависят от следующих факторов: 1) вида изделия (деталь, СЕ, комплекс, комплект); 2) объема выпуска изделия; 3) типа производства.

При обеспечении технологичности конструкции применяют два вида оценки: качественную и количественную. Сущность **качественной оценки технологичности конструкции** состоит в выборе лучшего варианта без определения количественной степени его превосходства. Качественная оценка может заключаться не только в выборе лучшего варианта конструкции изделия, но и в оценке степени соблюдения требований и нормативов, отражающих конструктивно – технологические свойства изделия и определяющие минимальные затраты при его изготовлении.

Качественная оценка характеризует технологичность конструкции обобщенно, на основании опыта исполнителя и, следовательно, в большей степени зависит от квалификации лица, ее производящего, и обладает большим субъективизмом.

Качественная оценка технологичности изделия предшествует количественной, определяет целесообразность проведения количественной оценки и соответственно затрат времени на определение численных значений показателей технологичности.

Для уменьшения субъективизма качественной оценки существует перечень требований, которыми надо пользоваться при выполнении работ по отработке изделия на технологичность. В

зависимости от конструктивно-технологических особенностей изделия технологические требования могут конкретизироваться. Так, например, одни требования предъявляются к отливкам, другие - к штамповкам, третьи - к сборочным единицам и т.д. Требования могут быть общими и конкретными - регламентирующими параметры конструктивных и технологических элементов, сортаменты проката, марки применяемого материала и т.д.

Основные технологические требования к изделиям, используемые при качественной оценке технологичности конструкции:

- 1) требования к конструкциям сборочных единиц (СЕ):
  - к составу СЕ;
  - к соединениям составных частей СЕ;
- 2) требования к конструкции деталей:
  - к деталям при сборке;
  - к конструкции детали при механической обработке;
    - требования к конструктивным элементам деталей, обрабатываемых резанием (к поверхностям, к отверстиям, к гнездам и пазам);
    - к типовым деталям (типа валов, корпусов, втулок, дисков и трубчатых валов, рычагов и кронштейнов).

Сущность **количественной оценки технологичности конструкции** состоит в выборе лучшего конструктивного варианта с помощью количественных показателей. Количественная оценка технологичности конструкции изделия выражается показателем, численное значение которого характеризует степень удовлетворения требованиям к технологичности конструкции.

Система количественной оценки технологичности конструкции предусматривает два вида показателей:

1. Показатели *разрабатываемой конструкции*. Они характеризуют реальные, подвергаемые сравнению варианты изделия, проявляющиеся в процессе проектирования, подготовки производства и в производстве.

2. *Базовые показатели*. Это оптимальные, желательные показатели наилучшие в данных условиях конструкции изделия. Эта конструкция может быть не реальной, а теоретической. Базовые показатели применяются как цель, к которой надо стремиться при разработке реальной конструкции.

Показатели технологичности разрабатываемой конструкции по своей значимости делятся на основные и дополнительные.

*Основные показатели:*

1. Трудоемкость изготовления изделия:

$$T_{II} = \sum_{i=1}^n T_{IIi}, \quad (110)$$

где  $T_{IIi}$  - трудоемкость изготовления элементов, входящих в изделие;  $n$  – количество элементов изделия.

2. Технологическая себестоимость изделия :

$$C_{TI} = \sum_{i=1}^n C_{TIi}, \quad (111)$$

где  $C_{TIi}$  - технологическая себестоимость элементов, входящих в изделие.

3. Уровень технологичности по трудоемкости изготовления:

$$K_{y.T.} = \frac{T_{И}}{T_{И.Б.}}, \quad (112)$$

где  $T_{И.Б.}$  - трудоемкость изготовления базового варианта.

4. Уровень технологичности по себестоимости:

$$K_{y.C.} = \frac{C_T}{C_{ТБ}}, \quad (113)$$

где  $C_{ТБ}$  - технологическая себестоимость базового варианта.

*Дополнительные показатели:*

1. Масса изделия

$$M = \sum_{i=1}^n M_i, \quad (114)$$

где  $M_i$  - масса элементов, входящих в изделие.

2. Удельная материалоемкость изделия:

$$K_{y.M.} = \frac{M}{P}, \quad (115)$$

где  $P$  – основной технический параметр изделия (производительность машин, передаваемая энергия)

3. Коэффициент использования материала:

$$K_{И.М.} = \frac{M}{M_M}, \quad (116)$$

где  $M_M$  - масса материала, израсходованного на изделие.

4. Коэффициент применяемости материала:

$$K_{П.М.} = \frac{M_i}{M}, \quad (117)$$

где  $M_i$  - масса  $i$ -го материала в изделии.

5. Коэффициент сборности:

$$K_{С.Б.} = \frac{E}{E + Д},$$

где  $E$  – число СЕ в изделии;  $Д$  – число деталей в изделии, не вошедших в СЕ.

6. Коэффициент унификации изделия :

$$K_y = \frac{E_y + Д_y}{E + Д}, \quad (118)$$

где  $E_y$ ,  $Д_y$  - число унифицированных СЕ и деталей.

7. Коэффициент унификации деталей изделия:

$$K_{y.д.} = \frac{Д_y}{Д} \quad (119)$$

8. Коэффициент стандартизации изделия:

$$K_{СТ} = \frac{E_{СТ} + Д_{СТ}}{E + Д}, \quad (120)$$

где  $E_{СТ}$ ,  $Д_{СТ}$  - число стандартных СЕ и деталей.

9. Коэффициент стандартизации деталей изделия:

$$K_{СТ.д} = \frac{Д_{СТ}}{Д} \quad (121)$$

10. Коэффициент унификации конструктивных элементов:

$$K_{у.э.} = \frac{Q_{у.э.}}{Q_э}, \quad (122)$$

где  $Q_{у.э.}$  - количество унифицированных типоразмеров конструктивных элементов

11. Удельная трудоемкость изготовления изделия:

$$T_{уд} = \frac{T_{и}}{P}. \quad (123)$$

12. Удельная технологическая себестоимость изготовления изделия:

$$C_{уд} = \frac{C_{тп}}{P}. \quad (124)$$

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Афонькин М.Г. Производство заготовок в машиностроении; 2-е изд. / М.Г. Афонькин, В.Б. Звягин. – СПб.: Политехника, 2007. – 380 с.
2. Балакшин Б.С. Основы технологии машиностроения / Б.С. Балакшин. – М.: Машиностроение, 1969. – 550 с.
3. Балакшин Б.С. Теория и практика технологии машиностроения. В 2-х кн. / Б.С. Балакшин. – М.: Машиностроение, 1982. – 268 с.
4. Бабичев А.П. Физико-технологические основы методов обработки / А.П. Бабичев, М.А. Тамаркин, В.А. Лебедев и др.; под ред. А.П. Бабичева. – Ростов н/Д: Феникс, 2006. – 409 с.
5. Базров Б.М. Основы технологии машиностроения: учебник / Б.М. Базров. – М.: Машиностроение, 2005. – 736 с.
6. Безжон В.И. Технологичность конструкций машин: учеб. пособие / В.И. Безжон. – Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2000.
7. Колесов И.М. Основы технологии машиностроения / И.М. Колесов. – М.: Высшая школа, 2001. – 591 с.

8. Косилова А.Г. Точность обработки, заготовки и припуски в машиностроении: справочник технолога / А.Г. Косилова, Р.К. Мецераков, М.А. Калинин. – М.: Машиностроение, 1976. – 288 с.

9. Клименков С.С. Проектирование и производство заготовок в машиностроении / С.С. Клименков. – Минск: Техноперспектива, 2008. – 408 с.

10. Кондаков А.И. Курсовое проектирование по технологии машиностроения / А.И. Кондаков. – М.: Кнорус, 2012. – 399 с.

11. Кондаков А.И. Выбор заготовок в машиностроении: справ. / А.И. Кондаков, А.С. Васильев. – М.: Машиностроение, 2007. – 559 с.

12. Лебедев Л.В. Технология машиностроения: учебник / Л.В. Лебедев, А.У. Мнацаканян, А.А. Погонин и др. – М.: Издательский центр «Академия», 2006. – 528 с.

13. Маталин А.А. Технология машиностроения / А.А. Маталин. – СПб.: Машиностроение, 2008. – 512 с.

14. Межотраслевые укрупненные нормативы времени работ, выполняемых на токарно-винторезных станках (Единичное и мелкосерийное производство). [Электрон. ресурс]. – Режим доступа: <http://referent.mubint.ru>

15. Межотраслевые укрупненные нормативы времени работ, выполняемых на сверлильных станках (Единичное и мелкосерийное производство). [Электрон. ресурс]. – Режим доступа: <http://referent.mubint.ru>

16. Межотраслевые укрупненные нормативы времени работ, выполняемых на зубообрабатывающих станках (Единичное и мелкосерийное производство). [Электрон. ресурс]. – Режим доступа: <http://referent.mubint.ru>

17. Межотраслевые укрупненные нормативы времени работ, выполняемых на шлифовальных станках (Единичное и мелкосерийное производство). [Электрон. ресурс]. – Режим доступа: <http://referent.mubint.ru>

18. Межотраслевые укрупненные нормативы времени работ, выполняемых на отделочно-расточных станках (Единичное и мелкосерийное производство). [Электрон. ресурс]. – Режим доступа: <http://referent.mubint.ru>

19. Мельников А.С. Технология машиностроения: основы достижения качества машины: учеб. пособие / А.С. Мельников. – Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2009. – 428 с.

20. Мельников А.С. Влияние методов достижения показателей точности машины на организацию сборочного процесса: учеб. пособие / А.С. Мельников, Г.А. Прокопец, А.И. Азарова. – Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2004. – 59 с.

21. Мухин А.В. Производство деталей металлорежущих стан-

ков / А.В. Мухин, О.В. Спиридонов, А.Г. Схиртладзе, Г.А. Харламов. – М.: Машиностроение, 2003. – 559 с.

22. Новиков М.П. Основы технологии сборки машин и механизмов / М.П. Новиков. – М.: Машиностроение, 1980. – 592 с.

23. Обработка металлов резанием: справочник технолога / под ред. А.А. Панова. – М.: Машиностроение, 2004. – 784 с.

24. Общемашиностроительные нормативы времени на слесарную обработку деталей и слесарно-сборочные работы по сборке машин. Мелкосерийное и единичное производство. – М: ВНИИТЭМР, 1987.

25. Общемашиностроительные нормативы времени и режимов резания для нормирования работ, выполняемых на универсальных и многоцелевых станках с числовым программным управлением. Ч.1: Нормативы времени. – М.: Экономика, 1990.

26. Общемашиностроительные укрупненные нормативы времени на работы, выполняемые на малогабаритных металлорежущих станках. Среднесерийное и мелкосерийное производство. – М.: НИИ труда, 1986.

27. Радкевич Я.М. Расчет припусков и межоперационных размеров в машиностроении / Я.М. Радкевич, В.А. Тимирязев, А.Г. Схиртладзе, М.С. Островский. – М.: Высшая школа, 2004.

28. Справочник технолога-машиностроителя: в 2 т. / под ред. А.М. Дальского, А.Г. Суслова, А.Г. Косиловой, Р.К. Мещерякова; 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение-1, 2001 – Т.1. – 656 с. – Т.2. – 496 с.

29. Общемашиностроительные нормативы времени и режимов резания. – М.: Экономика, 1990. – 470 с.

30. Ординарцев И.А. Справочник инструментальщика / И.А. Ординарцев, Г.В. Филлипов и др.; под общ. ред. И.А. Ординарцева. – Л.: Машиностроение, 1987.

31. Суслов А.Г. Технология машиностроения: учебник для студентов машиностроительных специальностей вузов / А.Г. Суслов. – М.: Машиностроение, 2007. – 430 с.

32. Серебеницкий П.П. Краткий справочник технолога-машиностроителя / П.П. Серебеницкий. – СПб.: Политехника, 2007. – 951 с.

33. Тамаркин М.А. Технология сборочного производства / М.А.Тамаркин, И.В. Давыдова, Э.Э. Тищенко – Ростов н/Д: Феникс, 2007. – 270 с.

34. Бурцев В.М. Технология машиностроения: в 2 т. Т.1. Основы технологии машиностроения: учебник / В.М. Бурцев, А.С. Васильев, А.М. Дальский и др.; под ред. А.М. Дальского. – М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1999.

35. Бурцев В.М. Технология машиностроения: в 2 т. Т.2.

Производство машин: учебник / В.М. Бурцев, А.С. Васильев, О.М. Левев и др.; под ред. Г.М. Мельникова. – М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1999.

36. Жуков Э.Л. Технология машиностроения: в 2 кн. Кн. 1. Основы технологии машиностроения: учеб. пособие / Э.Л. Жуков, И.И. Козарь, С.Л. Мурашкин и др.; под ред. С.Л. Мурашкина. – М.: Высшая школа, 2003.

37. Жуков Э.Л. Технология машиностроения: в 2 кн. Кн. 1. Производство деталей машин: учеб. пособие / Э.Л. Жуков, И.И. Козарь, С.Л. Мурашкин и др.; под ред. С.Л. Мурашкина. – М.: Высшая школа, 2003.

38. Харламов Г.А. Припуски на механическую обработку: справ. / Г.А. Харламов, А.С. Тарапанов. – М.: Машиностроение, 2006. – 256 с.

39. ГОСТ 53464-2009. Отливки из металлов и сплавов. Допуски размеров, массы и припуски на механическую обработку.

40. ГОСТ 7062-90. Поковки из углеродистой и легированной стали, изготавливаемые ковкой на прессах. Припуски и допуски. – М.: Изд-во стандартов, 1991. – 46 с.

41. ГОСТ 7505-89. Поковки стальные штампованные. Допуски, припуски и кузнечные напуски. – М.: Изд-во стандартов, 1990. – 52 с.

42. ГОСТ 7829-70. Поковки из углеродистой и легированной стали, изготавливаемые ковкой на молотах. Припуски и допуски. – М.: Изд-во стандартов, 1989. – 41 с.