



**В. Ю. БЛЮМЕНШТЕЙН А. А. КЛЕПЦОВ**

**ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИИ МАШИНОСТРОЕНИЯ**

Учебное пособие

КЕМЕРОВО 2017

Министерство образования и науки РФ  
Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Кузбасский государственный технический университет  
имени Т. Ф. Горбачева»

В. Ю. БЛЮМЕНШТЕЙН А. А. КЛЕПЦОВ

## **ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИИ МАШИНОСТРОЕНИЯ**

Учебное пособие

КЕМЕРОВО 2017

УДК 621.7(075.8)

Рецензенты:

Кафедра «Технология машиностроения» Московского государственного технического университета «МАМИ»

Доктор технических наук, профессор Московского государственного технического университета «МАМИ» М. В. Вартанов

Блюменштейн, В. Ю. Основы технологии машиностроения : учеб. пособие. – 2-е изд., испр. и доп. / В. Ю. Блюменштейн, А. А. Клепцов; КузГТУ. – Кемерово, 2017. – 308 с.

ISBN 978-5-906888-61-7

Приведен лекционный материал по курсу «Основы технологии машиностроения», с помощью которого студенты закрепляют полученную информацию на занятиях, подготавливаются к практическим и лабораторным занятиям, изучают материал в рамках самостоятельной работы, предусмотренной рабочей программой дисциплины.

Предназначено для студентов направлений 15.03.01 «Машиностроение» и 15.03.05 «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств», также может быть полезно магистрантам и аспирантам машиностроительных специальностей.

ISBN 978-5-906888-61-7

УДК 621.7(075.8)

© КузГТУ, 2017

© Блюменштейн В. Ю.,  
Клепцов А. А., 2017

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие.....	6
Введение.....	7
1 ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ.....	8
2 ТИПЫ И ОРГАНИЗАЦИОННЫЕ ФОРМЫ ПРОИЗВОДСТВА.....	14
3 МАШИНА КАК ОБЪЕКТ ПРОИЗВОДСТВА.....	19
3.1 Служебное назначение машины.....	19
3.2 Качество продукции.....	25
3.2.1 Точность деталей и машин.....	26
3.3 Техничко-экономические показатели изготовления машины.....	32
4 ОСНОВЫ ДОСТИЖЕНИЯ КАЧЕСТВА МАШИНЫ.....	34
4.1 Основные понятия теории размерных цепей.....	34
4.2 Статистические методы исследования технологических процессов.....	38
4.2.1 Влияние действия отдельных факторов на изменение характеристик качества изделий.....	45
4.3 Погрешность замыкающего звена размерной цепи.....	50
4.4 Методы достижения точности замыкающего звена раз- мерной цепи.....	53
4.4.1 Метод полной взаимозаменяемости.....	53
4.4.2 Метод неполной взаимозаменяемости.....	57
4.4.3 Метод групповой взаимозаменяемости.....	60
4.4.4 Метод пригонки.....	63
4.4.5 Метод регулирования.....	67
4.5 Основы теории базирования.....	71
4.5.1 Классификация баз.....	77
4.5.2 Определенность и неопределенность базирования.....	78
4.5.3 Смена баз.....	80
4.5.4 Принцип совмещения и единства баз.....	83
4.5.5 Методы получения и измерения расстояний, размеров и относительных поворотов поверхностей деталей.....	83
4.5.6 Погрешность измерения.....	87
5 ОСНОВЫ ДОСТИЖЕНИЯ КАЧЕСТВА ДЕТАЛЕЙ МАШИН.....	91

5.1 Сокращение погрешности установки.....	96
5.1.1 Основы выбора технологических баз.....	97
5.1.2 Выбор технологических баз для первой операции обработки детали.....	100
5.1.3 Выбор измерительных баз.....	111
5.1.4 Сокращение погрешностей установки за счет ряда и дополнительных факторов.....	112
5.2 Сокращение погрешности статической настройки.....	114
5.2.1 Настройка и поднастройка технологической системы...	119
5.3 Сокращение погрешности динамической настройки технологической системы.....	124
5.3.1 Жесткость технологической системы.....	126
5.3.2 Вибрации технологической системы.....	135
5.3.3 Размерный износ режущего инструмента.....	138
5.3.4 Температурные деформации технологической системы	141
5.3.5 Деформации деталей из-за перераспределения остаточных напряжений.....	145
6 УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН.....	147
6.1 Поверхностный слой детали.....	147
6.2 Основные параметры качества поверхностного слоя деталей машин.....	152
6.3 Шероховатость поверхности.....	158
6.3.1 Параметры шероховатости.....	158
6.3.2 Обозначения шероховатости поверхности.....	163
6.3.3 Методы и средства оценки шероховатости поверхности.....	175
6.4 Волнистость поверхности.....	186
6.5 Регулярные микрорельефы.....	188
6.6 Упрочнение (наклеп) поверхностного слоя.....	193
6.6.1 Параметры упрочнения.....	193
6.6.2 Методы определения параметров упрочнения.....	197
6.7 Остаточные напряжения.....	207
6.7.1 Параметры остаточных напряжений.....	207
6.7.2 Методы определения остаточных напряжений.....	212
6.8 Влияние технологических факторов на формирование качества поверхностного слоя деталей машин.....	222

6.8.1 Влияние технологических факторов на шероховатость поверхности.....	223
6.8.2 Влияние технологических факторов на упрочнение и остаточные напряжения.....	235
6.9 Влияние качества поверхностного слоя на эксплуатационные свойства деталей машин.....	242
6.10 Технологические методы повышения качества поверхностного слоя и эксплуатационных свойств деталей машин.....	253
6.11 Технологическая наследственность в машиностроении.....	257
<b>7 ОСНОВЫ СНИЖЕНИЯ СЕБЕСТОИМОСТИ МАШИН.....</b>	<b>271</b>
7.1 Основы технического нормирования.....	271
7.2 Определение экономической эффективности технологических процессов.....	277
7.2.1 Выбор экономичного варианта технологического процесса.....	279
7.3 Технологические методы снижения себестоимости изделий.....	281
7.3.1 Сокращение расходов на материалы.....	283
7.3.2 Сокращение расходов на заработную плату.....	286
7.3.3 Технологические основы увеличения производительности труда.....	286
7.3.4 Типизация технологических процессов.....	296
7.3.5 Технологичность конструкций машин.....	298
7.3.6 Обслуживание одним рабочим нескольких единиц оборудования.....	299
<b>ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ</b>	<b>301</b>
<b>СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....</b>	<b>307</b>

## Предисловие

Курс технологии машиностроения, читаемый студентам машиностроительных направлений технических университетов состоит из двух частей: основы технологии машиностроения и специальная часть. В дисциплине «Основы технологии машиностроения» рассматриваются общие и принципиальные теоретические положения технологии машиностроения, справедливые для всех отраслей машиностроения. В дисциплине «Технология машиностроения. Специальная часть» изучается технология производства машин в различных отраслях.

Данное учебное пособие содержит подробные сведения об основных принципах создания машин заданного качества при наименьших затратах на их производство. Рассмотрены теоретические положения, служащие основой при обеспечении основных показателей качества деталей машин и машины в целом. Значительное внимание уделено обеспечению такого важного показателя качества деталей машин, как качество их поверхностного слоя. Рассмотрены основные принципы и технологические методы снижения себестоимости изготовления машин.

При подготовке учебного пособия использовались последние достижения технологии машиностроения, а также собственные методические разработки авторов.

Учебное пособие может быть полезно студентам при выполнении курсовых проектов и выпускных квалификационных работ.

## Введение

Вся история развития производительных сил человечества связана с использованием машин. Потребность облегчить ручной труд, сделать его более производительным и качественным, привела к созданию и совершенствованию сначала механизмов, а затем и машин, которые, совершенствуясь, способствовали развитию прогресса, появлению новых потребностей и отраслей производства. Эта потребность является основным стимулом развития машиностроения, как средства реализации постоянно развивающихся технологий.

Любая машина выполняет свое назначение в том случае, если она обладает соответствующим качеством. С другой стороны, затраты различных видов ресурсов на создание машины должны быть приемлемыми, и, желательно, минимальными. Поэтому перед технологией машиностроения, как наукой, стоит две задачи: обеспечение требуемого качества машин, и снижение затрат на производство машин.

Учебное пособие «Основы технологии машиностроения» должно помочь студентам при изучении теории технологии машиностроения. Первые главы пособия посвящены разъяснению основных положений и понятий, используемых в технологии машиностроения. Далее рассмотрены общие положения размерных связей в машине, а также основные положения теории размерных цепей, без уяснения которых невозможно понять взаимосвязь действий по обеспечению требуемого качества машины на основных этапах жизненного цикла машины.

Большой объем материала учебного пособия отведен вопросам обеспечения качества создаваемой машины. При этом, помимо основного показателя качества любой машины – точности, значительное внимание уделено обеспечению и управлению качеством поверхностного слоя деталей машин, определяющим основные показатели надежности и долговечности машины.

В заключительной главе учебного пособия рассмотрены вопросы снижения затрат на производство машин, а также технологические основы повышения производительности технологических процессов.



## 1 ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

*Технологией машиностроения* называется отрасль науки, изучающая связи и устанавливающая закономерности, действующие в процессе изготовления машин с целью использования этих закономерностей для обеспечения требуемого качества машин при наименьших затратах на их производство.

Изучение связей (механических, физических, размерных, временных, информационных, экономических и организационных) осуществляется с целью совершенствования существующих и создания новых технологических процессов и методов обработки и сборки изделий машиностроения требуемого качества с минимальными затратами труда, материальных и энергетических ресурсов.

*Предметом науки* технология машиностроения являются процессы изготовления машин – так называемые производственные и технологические процессы.

Все определения и понятия технологии машиностроения содержатся в стандартах Единой системы технологической документации (ЕСТД) и Единой системы технологической подготовки производства (ЕСТПП):

– ГОСТ 14.004–83 «Основные положения. Термины и определения основных понятий ЕСТПП»;

– ГОСТ 3.1109–82 «Термины и определения основных понятий ЕСТД».

*Технологическая подготовка производства* – совокупность мероприятий, обеспечивающих технологическую готовность производства.

*Технологическая готовность производства* – наличие на предприятии полных комплектов конструкторской и технологической документации и средств технологического оснащения, необходимых для выпуска заданного объема продукции с установленными технико-экономическими показателями.

*Средства технологического оснащения (СТО)* включают в себя следующие элементы:

– технологическое оборудование;

– средства механизации и автоматизации (СМА) технологических процессов;

– технологическую оснастку (ТО).

К технологической оснастке относятся:

- режущий инструмент;
- вспомогательный инструмент;
- мерительный инструмент;
- приспособления.

*Производственным процессом* в машиностроении называется совокупность всех действий людей и орудий труда, необходимых на данном предприятии для изготовления и ремонта продукции.

Производственный процесс машиностроительного завода делится на несколько этапов, включая в себя:

- получение заготовок;
- их обработку;
- контроль качества;
- транспортирование;
- хранение деталей и заготовок;
- сборку машины;
- испытание, регулировки;
- окраску, отделку и упаковку.

Обычно каждый из этих этапов совершается на отдельных участках или в отдельных цехах.

Каждое предприятие имеет свой производственный процесс: даже если предприятия производят одинаковую продукцию, их производственные процессы могут иметь значительные различия.

*Технологический процесс* – часть производственного процесса, содержащая целенаправленные действия по изменению и определению состояния предмета труда.

Другими словами, технологический процесс – это часть производственного процесса, во время которой происходит изменение качественного состояния объекта производства:

- изменение физических, химических свойств материалов;
- изменение формы, размеров заготовок;
- изменение качества поверхности и внешнего вида детали.

Измерение – тоже технологический процесс, поскольку при этом происходит определение состояния изделия.

Существенным является тот факт, что эти действия должны быть целенаправленными. В этой связи хранение деталей или за-

готовок на складе не является технологическим процессом, даже если происходит изменение их состояния (например, они корродируют), поскольку эти изменения не вызваны целенаправленными действиями.

Для выполнения технологического процесса должны быть организованы рабочие места.

*Рабочее место* – это часть объема цеха, предназначенная для выполнения работы одним рабочим или группой рабочих (бригадой), в которой (в этой части объема цеха) помещены технологическое оборудование, средства механизации и автоматизации технологических процессов (подъемно-транспортное оборудование, часть конвейера и др.) и, на ограниченное время, технологическая оснастка и предметы труда.

Технологический процесс, как правило, делится на несколько частей. Существует две причины такого деления:

1. Физическая причина – технически сложно или невозможно создать оборудование, способное на одном рабочем месте полностью обработать деталь.

2. Экономическая причина – даже если появятся технические возможности создания такого оборудования, это будет экономически нецелесообразно, поскольку такой станок будет очень дорого стоить. Поэтому любой технологический процесс делится на технологические операции.

*Технологическая операция* – это законченная часть технологического процесса, выполняемая на одном рабочем месте.

*Технологическая операция – основной элемент производственного оперативного планирования и учета.*

Технологическая операция в свою очередь содержит ряд технологических переходов.

*Технологический переход* – законченная часть технологической операции, выполняемая одними и теми же средствами технологического оснащения при постоянных технологических режимах и установке.

При механической обработке технологический переход – часть операции по обработке одной поверхности одним инструментом и на одном рабочем месте.

При сборке – это присоединение одной детали к другой с требуемой точностью.

В частном случае технологическая операция может состоять из одного технологического перехода. При этом под *установкой* понимается физический процесс установления заготовки либо детали в приспособлении, на столе станка, на других видах оборудования, на конвейере, с требуемой точностью.

*Установ* – это часть технологической операции, выполняемая при неизменном положении обрабатываемой заготовки или собираемой сборочной единицы.

*Позиция* – это фиксированное положение, занимаемое неизменно закрепленной обрабатываемой заготовкой или собираемой сборочной единицей совместно с приспособлением относительно инструмента или неподвижной части оборудования при выполнении определенной части операции.

Деталь однократно устанавливается на позиции «установка» (рис. 1.1).

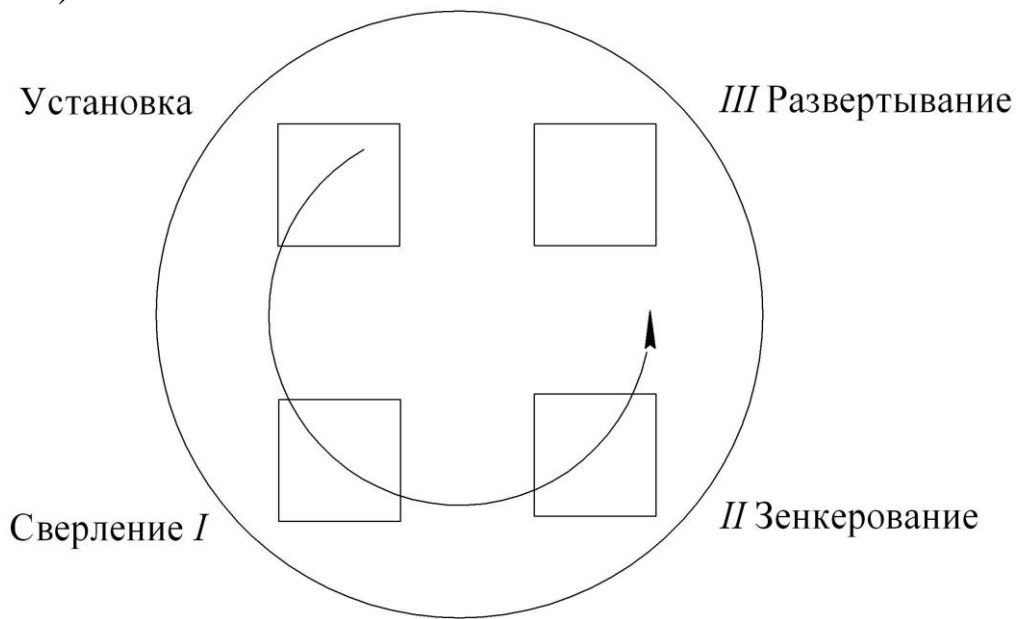


Рис. 1.1 Обработка заготовки на четырехпозиционном станке

Далее деталь вместе с приспособлением или столом станка переводится во вторую позицию *I*, на которой производится сверление отверстия, затем в третью позицию *II*, где производится зенкерование отверстия, и далее в четвертую позицию *III*, производящую развертывание отверстия.

В ряде случаев переходы могут состоять из одного или нескольких рабочих ходов.

При этом под *рабочим ходом* понимается законченная часть технологического перехода, состоящая из однократного перемещения инструмента относительно заготовки, сопровождаемого изменением формы, размеров, качества поверхности и свойств заготовки.

При изучении технологических процессов с целью их рационализации отдельные их части делятся на приемы.

*Прием* – это совокупность действий рабочего, применяемых при выполнении технологического перехода или его части и объединенных одним целевым назначением.

При выполнении каждого технологического процесса, технологической операции, технологического перехода затрачивается определенное количество труда определенной квалификации, при этом затраты труда определяются рабочим временем.

Количество времени, затрачиваемое рабочим определенной квалификации на выполнение того или иного технологического процесса или его части, называется *трудоемкостью*. Трудоемкость измеряется в *нормочасах*. Для определения плановой трудоемкости используется понятие нормы времени.

*Норма времени* – это *регламентированное время* выполнения *определенного объема работ в определенных производственных условиях* одним или несколькими исполнителями *определенной квалификации*. Для малотрудоемких операций, для которых нормы времени – доли секунды, используется норма выработки.

*Норма выработки* – это *регламентированный объем работы*, который должен быть выполнен в единицу времени в *определенных производственных условиях* одним или несколькими исполнителями *определенной квалификации*.

Единицей нормирования является технологическая операция, поэтому норма времени назначается на *технологическую операцию* и называется «*норма штучно-калькуляционного времени*», назначается на единицу изделия и всегда измеряется в *минутах*.

Как правило, завод делает не по одной машине, а выпускает их партиями. Таким образом, технологические процессы повторяются неоднократно, циклично.

*Производственный цикл* – это интервал времени от начала до окончания производственного процесса изготовления или ремонта изделия.

*Программа выпуска продукции* – установленный для данного предприятия перечень изготавливаемых или ремонтируемых изделий с указанием объема выпуска по каждому наименованию, типоразмеру и исполнению на планируемый период времени – календарный год.

*Объем выпуска* по каждому изделию может быть указан тремя способами:

- в натуральном выражении (в количестве единиц продукции, в штуках);
- в стоимостном выражении (в миллионах рублей);
- в трудовом выражении (в нормочасах).

*Серия изделия* – все изделия, изготовленные по конструкторской и технологической документации без изменения ее обозначения.

*Такт выпуска* – интервал времени, через который периодически производится выпуск изделий или заготовок определенного наименования, типоразмера и исполнения. Такт выпуска измеряется в минутах.

*Производственная партия* – предметы труда одного наименования и типоразмера, запускаемые в обработку в течение определенного интервала времени при одном и том же подготовительно-заключительном времени на операцию, т.е. без переналадки оборудования.

## 2 ТИПЫ И ОРГАНИЗАЦИОННЫЕ ФОРМЫ ПРОИЗВОДСТВА

*Тип производства* – классификационная категория производства, выделяемая по признакам широты номенклатуры, регулярности, стабильности и объема выпуска продукции.

Тип производства определяется коэффициентом закрепления операций:

$$K_{zo} = \frac{N_o}{C_p},$$

где  $N_o$  – количество различных операций, выполняемых на участке или в цехе в течение месяца;  $C_p$  – количество рабочих мест на участке или в цехе.

Коэффициент закрепления операций:

1. Определяется для участка или цеха, следовательно, в пределах предприятия могут существовать участки и цеха с различными типами производства.

2. Отчетным периодом при определении типа производства является *месяц* (не квартал, не неделя и не год).

3. Физический смысл этого коэффициента представляет собой количество переналадок оборудования на участке или в цехе за месяц, т.е. среднее количество различных операций, закрепленных за рабочим местом на участке или в цехе.

В соответствии с величиной этого коэффициента различают три типа производства.

1. Массовое производство

$$K_{zo} = 1.$$

При этом под массовым понимается производство, характеризующееся большим объемом выпуска изделий, непрерывно изготавливаемых или ремонтируемых продолжительное время, в течение которого на большинстве рабочих мест выполняется одна и та же технологическая операция.

Основные признаки массового производства:

- изделие изготавливаются в большом количестве длительное время, в неизменном виде, конструкция изделия меняется плавно;

- применяемое оборудование и оснастка – специальное и специализированное, широко применяются автоматические линии, автоматические контрольные и измерительные устройства;
- оборудование расположено в порядке выполнения операций (по потоку), а изготавливаемая деталь передается с одной операции на следующую сразу после выполнения предшествующей операции, как правило, при помощи специальных транспортных устройств;
- заготовки близки по форме и размерам к готовой детали;
- массовому производству присуща поточная форма организации производства, при которой операции обработки или сборки машины закреплены за определенным оборудованием или рабочими местами; в поточно-массовом производстве путь прохождения детали по линии самый короткий;
- рабочие низкой квалификации при наличии настройщиков, высококвалифицированных наладчиков, рабочих-операторов высокой квалификации;
- стоимость и трудоемкость изготовления изделий самые низкие, полная взаимозаменяемость при сборке.

В условиях массового производства изготавливаются автомобили, тракторы, двигатели, подшипники и др.

## 2. Серийное производство

Серийное производство характеризуется изготовлением или ремонтом изделий периодически повторяющимися партиями.

$$1 < K_{30} \leq 40.$$

В зависимости от количества изделий в партии и значения коэффициента закрепления операций различают мелкосерийное, среднесерийное, крупносерийное производство.

Для мелкосерийного производства:

$$20 < K_{30} \leq 40.$$

Для среднесерийного производства:

$$10 < K_{30} \leq 20.$$

Для крупносерийного производства:

$$1 < K_{30} \leq 10.$$

Основные признаки серийного производства:



- изделия выпускаются партиями (сериями), выпуск периодически повторяется. При этом время выполнения операций на отдельных станках может быть не согласовано со временем операций на других станках;

- продукция установившегося типа, имеющая широкое применение (станки, угольные комбайны, электровозы, компрессоры, прессы, вентиляторы, текстильные машины и др.);

- станки применяются разнообразных типов: универсальные, специализированные, специальные, автоматизированные; применение специализированного оборудования обосновывается технологом технико-экономическим расчетом;

- станки располагаются в последовательности технологических операций для одной или нескольких деталей, требующих одинакового порядка обработки (по группам, либо по потоку). В той же последовательности образуется и движение деталей (так называемые предметно-замкнутые участки);

- инструмент и оснастка универсальные и специализированные, применяются и разметка, и специальные приспособления;

- заготовки по своей форме ближе к форме и размерам готовой детали;

- рабочие имеют сравнительно низкую квалификацию;

- работа может производиться на настроенных станках, на рабочем месте выполняется несколько периодически повторяющихся операций;

- изготовленные детали хранятся во время работы у станков и затем транспортируются всей партией.

Серийное производство экономичнее единичного вследствие более эффективного использования оборудования и специализации работающих. Увеличение производительности труда обеспечивает меньшую себестоимость продукции.

### 3. Единичное производство

Единичное – производство, характеризуемое малым объемом выпуска одинаковых изделий, повторное изготовление и ремонт которых не предусматривается.

Основные признаки единичного производства:

- изделия изготавливаются единичными экземплярами разнообразными по конструкции или размерам, причем повторяемость этих изделий редка или совсем отсутствует (турбостроение, судостроение), выпуск их в будущем не планируется. При этом продукция не имеет широкого распространения;

- универсальное оборудование, приспособления и измерительный инструмент;

- станки располагаются по группам, по признаку однородности обработки, т.е. создаются участки станков, предназначенных для одного вида обработки – токарные, строгальные, фрезерные и др.;

- на рабочих местах выполняются разнообразные операции при отсутствии периодического их повторения;

- заготовки имеют большие припуски на обработку;

- большая трудоемкость и высокая стоимость обработки;

- рабочие имеют высокую квалификацию, сборка производится с использованием слесарно-пригоночных работ, т.е. по месту и т.п.

Коэффициент закрепления операций не нормируется.

В настоящее время установлены две формы организации технологических процессов:

- непоточная;

- поточная.

*Поточная форма* производства характеризуется:

- специализацией каждого рабочего места на одной операции;

- постоянством такта выпуска;

- размещением рабочих мест в последовательности, строго соответствующей технологическому процессу;

- наличием специализированного транспорта.

*Непоточная форма* производства характеризуется:

- специализацией рабочих мест на группе операций;

- однородностью конструктивно-технологических признаков изделий;

- единством средств технологического оснащения одной или нескольких операций;

- отсутствием такта выпуска;

– отсутствием специализированного транспорта.

Поточная форма применяется для массового и серийного производства и реализуется в виде поточных линий (рис. 2.1).

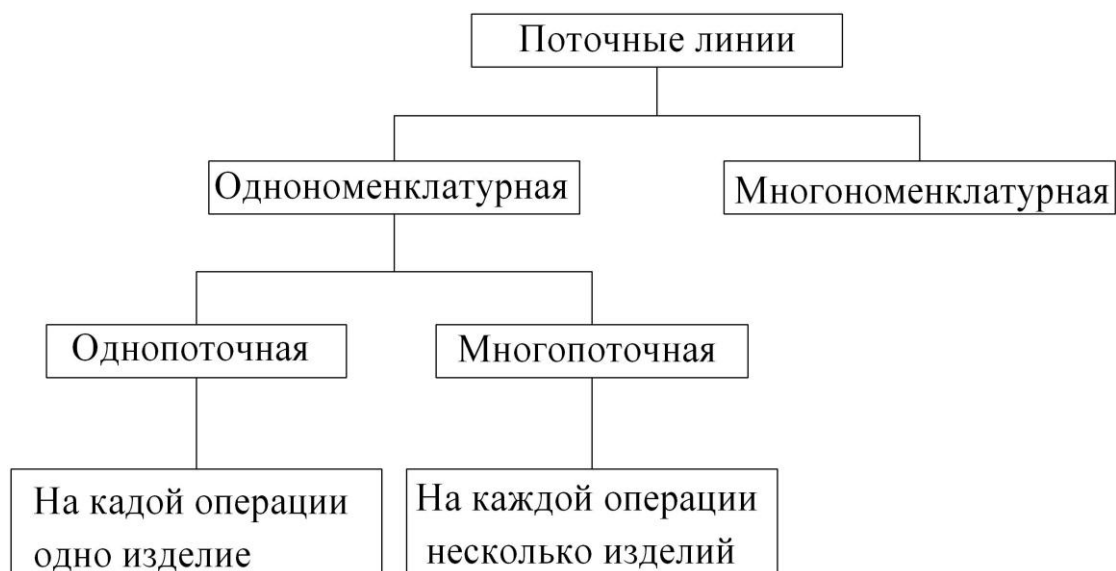


Рис. 2.1 Виды поточных линий

### 3 МАШИНА КАК ОБЪЕКТ ПРОИЗВОДСТВА

#### 3.1 Служебное назначение машины

Под служебным назначением машины понимается четко сформулированная и предельно уточненная задача, для решения которой создается машина [1, 2].

Формулировка служебного назначения машины должна содержать не только общую задачу, для решения которой создается машина, но и все дополнительные условия и требования, которые эту задачу максимально уточняют и конкретизируют.

Формулировка служебного назначения машины должна в первую очередь содержать следующие сведения [3]:

1. Данные о продукции, которая будет производиться машиной – чертежи изделий, их подробное описание.

2. Показатели производительности, которой должна обладать машина – программа выпуска изделий, их количество.

3. Описание технологических процессов изготовления изделий на данной машине.

4. Эстетические, эргономические, требования, требования техники безопасности, которые должны быть учтены при проектировании машины.

5. Требования к экономической эффективности, долговечности и надежности машины.

6. Перечень условий, в которых машине предстоит работать и производить продукцию требуемого качества с заданной производительностью.

При этом по каждому показателю служебного назначения должно быть установлено численное значение с указанием его допустимых отклонений.

Каждая машина выполняет свое служебное назначение с помощью определенных поверхностей или их сочетаний, которые называются *исполнительными*.

Во время работы машины между ее исполнительными поверхностями возникают и действуют различные связи – размерные (расстояния между поверхностями), кинематические (передача движений), динамические (передача сил и моментов, необходимых для осуществления машиной технологического процесса), электромагнитные, гидравлические, оптические, временные и

другие связи. К числу связей относятся и свойства материалов, из которых изготовлены детали машин, поскольку бóльшая часть деталей может выполнять свое служебное назначение только будучи изготовленными из определенных материалов.

При этом все виды связей закладываются в машину в процессе ее создания в виде *размерных связей* (размеров, расстояний, относительных поворотов, формы, шероховатости поверхностей деталей и их допустимых отклонений) и в виде *связей материалов*.

Требуемые виды связей исполнительных поверхностей машины вытекают из ее служебного назначения, поэтому проектирование любой машины начинается с выбора необходимых видов связей, посредством которых машина должна выполнять свое служебное назначение. Затем должны быть выбраны исполнительные поверхности, между которыми должны быть осуществлены необходимые связи. Поскольку при создании любой машины технолог может реально влиять только на размерные связи (точность размеров, расстояний, зазоров, относительных поворотов и формы поверхностей деталей) и на связи материалов (свойства материалов деталей), все многообразие связей исполнительных поверхностей должно быть преобразовано в размерные связи и связи материалов. Затем на параметры размерных связей и связей материалов должны быть установлены допустимые отклонения, позволяющие машине выполнять свое служебное назначение с заданными значениями параметров.

Любая машина может быть описана с помощью системы уравнений вида

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

где  $y$  – параметр служебного назначения машины;  $x_1, x_2, \dots, x_n$  – параметры связей между исполнительными поверхностями машины.

Эти уравнения составляются в результате изучения физической сущности процессов, происходящих в машине.

Далее они должны быть преобразованы к виду:

$$x_1 = \varphi(y, x_2, \dots, x_n),$$

где  $x_1$  – параметры размерных связей между исполнительными поверхностями машины.

В качестве примера рассмотрен гидравлический насос.

Служебным назначением некоего насоса задано, что утечки должны быть не более 0,5 л/мин – это параметр служебного назначения машины  $y$ . Из курса гидравлики известно, что утечки зависят от давления жидкости  $p$ , от величины зазоров  $\delta$ , от вязкости жидкости  $\nu$ , от ее температуры  $T$ :

$$y = f(p, \delta, \nu, T).$$

Далее это уравнение преобразуется к виду:

$$\delta = \varphi(y, h, \nu, T),$$

т.е. определяется зависимость допустимых величин зазоров от величины параметра служебного назначения, который должен быть обеспечен при изготовлении машины, и параметров различных видов связей, заложенных конструктором при проектировании машины.

На основании этой зависимости определяются номинальные величины зазоров и их допустимые отклонения.

Исходя из требований служебного назначения, а также из заданного срока службы изделия, выбираются материалы деталей, обеспечивающие заданную прочность, износостойкость, срок службы и т.п. После этого разрабатываются конструктивные формы узлов и деталей.

Поверхности любой детали делятся на четыре группы:

- *исполнительные* – поверхности, с помощью которых деталь выполняет свое служебное назначение;
- *основные базы* – поверхности детали, определяющие ее положение в сборочном узле или машине;
- *вспомогательные базы* – поверхности детали, при помощи которых определяется положение всех других деталей, присоединяемых к данной детали;
- *свободные поверхности*, не выполняющие никаких функций и ограничивающие форму детали.

В первую очередь *разрабатываются конструктивные формы исполнительных поверхностей*. Вид и форма исполнительных поверхностей машин и их деталей устанавливаются ис-

ходя из их служебного назначения и в результате совокупного рассмотрения вида и характера необходимых связей, выявленных ранее. Большую роль при решении этой задачи играет *конструктивная преемственность*, под которой понимается использование предшествующего опыта машиностроения данного и смежного профиля. Изучая накопленный опыт, не следует отказываться и от попыток найти принципиально новые, более удачные решения.

В качестве примера рассмотрим процесс проектирования ступенчатого вала. Служебное назначение ступенчатого вала – передача крутящего момента определенной величины с помощью зубчатого колеса. При передаче незначительного момента ступенчатый вал представляет собой вал-шестерню, и его исполнительной поверхностью является зубчатый венец. Во всех остальных случаях ступенчатый вал, учитывая конструктивную преемственность, должен иметь в качестве исполнительных поверхностей цилиндрическую поверхность с опорным торцом для базирования зубчатого колеса и шпоночный паз или шлицевую поверхность для передачи крутящего момента с вала на зубчатое колесо (рис. 3.1, *а*). Вместе с тем, крутящий момент от ступенчатого вала зубчатому колесу может быть передан исполнительными поверхностями другой формы, например поверхностями равноосного контура (РК-профиль, рис. 3.1, *б*). В этом случае конструкция исполнительных поверхностей позволит избежать трудоемкой операции обработки шпоночного паза или шлицевой поверхности.

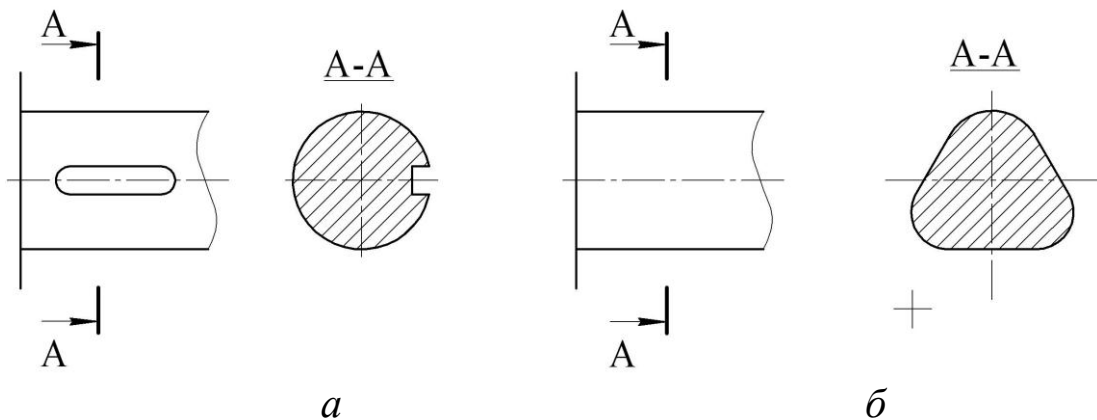


Рис. 3.1 Выбор формы исполнительных поверхностей

Затем *разрабатываются конструктивные формы основных баз детали*. Основные базы детали определяют ее положение в узле или машине и, следовательно, формируют систему координат детали в соответствии с ее служебным назначением. Так, служебное назначение ступенчатого вала требует, чтобы он имел возможность вращения и ось его вращения совпадала с геометрической осью исполнительных поверхностей. В соответствии с конструктивной преимуществом для выполнения этого условия вал должен устанавливаться в подшипниках качения или скольжения и в качестве основных баз иметь как минимум два комплекта торцевых и цилиндрических поверхностей, соосных с исполнительными поверхностями для установки подшипников (рис. 3.2).

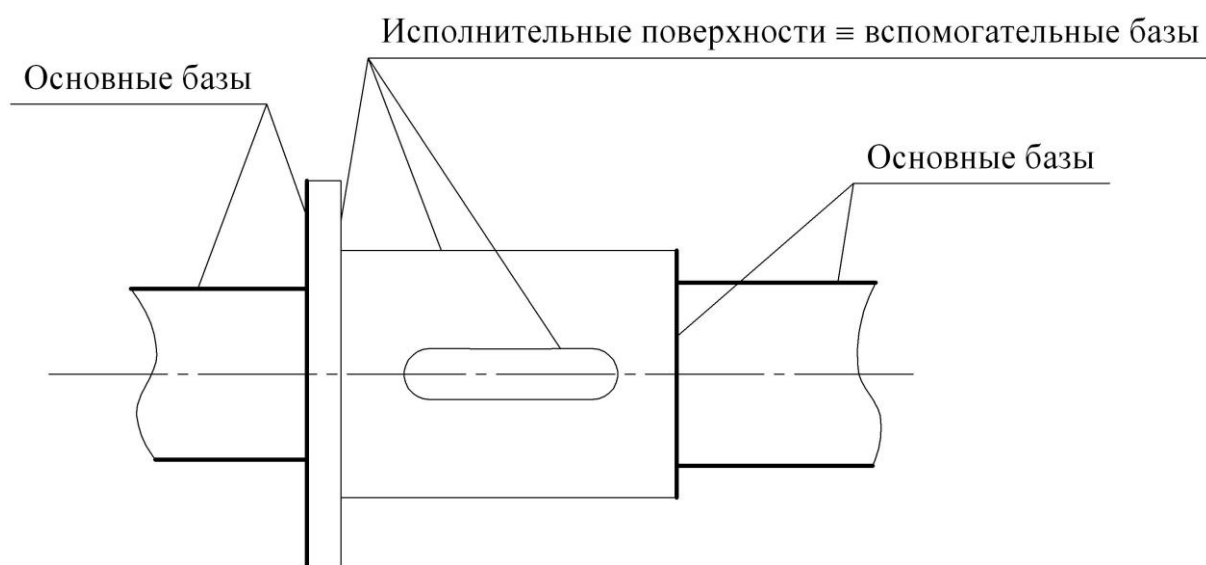


Рис. 3.2 Выбор формы основных баз

Следующим этапом является *разработка видов и конструктивных форм вспомогательных баз* деталей. Виды и формы этих поверхностей разрабатываются в соответствии с требованиями служебного назначения детали и особенностями тех видов связей, которые они осуществляют. Следует отметить, что в ряде случаев вспомогательными базами детали могут являться ее исполнительные поверхности. Так, в примере со ступенчатым валом поверхности, на которые базируется зубчатое колесо, являясь исполнительными, одновременно определяют положение зубчатого колеса на валу, т.е. формируют его систему координат и являются вспомогательными базами вала (см. рис. 3.2).



В последнюю очередь определяются конструктивные формы свободных поверхностей, при этом, поскольку они не выполняют никаких функций в соответствии со служебным назначением детали, основным условием при выборе их формы является простота их формообразования (рис. 3.3).

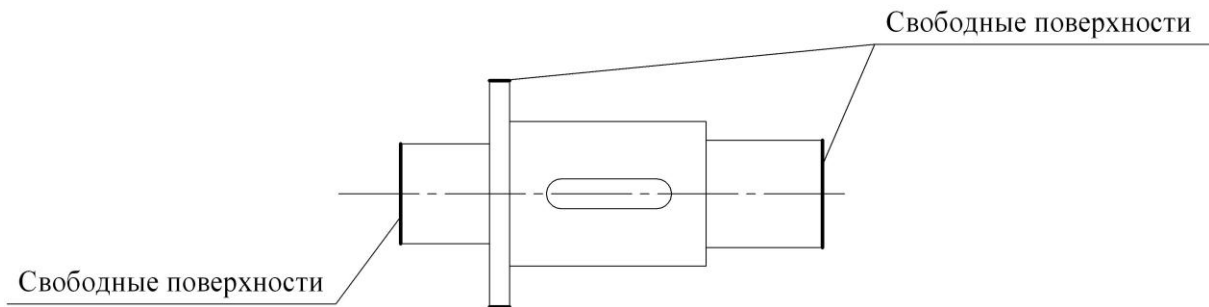


Рис. 3.3 Выбор формы свободных поверхностей

После того как спроектированы конструктивные формы деталей, их размеры определяются из кинематического и динамического расчета.

Из изложенного следует, что создание конструктивных форм деталей производится исходя из их служебного назначения и требований их наиболее экономичного изготовления.

В соответствии с этим под *деталью машины* понимается объем необходимого количества выбранного материала, ограниченного рядом поверхностей или их сочетаний, расположенных одни относительно других (выбранных за базы) в соответствии со служебным назначением детали в машине [1].

Поскольку детали являются исходными элементами при изготовлении любой продукции машиностроения, существует ряд определений для описания этой продукции.

*Изделие* – это любой предмет или набор предметов производства, подлежащих изготовлению на предприятии.

*Сборочная единица* – это изделие, составные части которого подлежат соединению между собой на предприятии-изготовителе сборочными операциями.

*Комплекс* – это два и более специфицированных изделия, не соединенных на предприятии-изготовителе сборочными операциями, но предназначенных для выполнения взаимосвязанных

эксплуатационных функций. В комплекс, как правило, входит и крепеж, т.е. связующие элементы.

*Комплект* – это два и более изделия, не соединенные на предприятии-изготовителе сборочными операциями и представляющие набор изделий, имеющих общее эксплуатационное назначение вспомогательного характера, например: комплект запасных частей, комплект ключей, комплект контрольно-измерительной аппаратуры.

### 3.2 Качество продукции

*Качество продукции* – это совокупность свойств продукции, обуславливающих ее способность удовлетворять определенные потребности в соответствии с ее назначением.

Основные понятия и определения в области управления качеством продукции установлены ГОСТ 15467–79 «Управление качеством продукции» и ГОСТ Р ИСО 9001–2001 «Системы менеджмента качества».

Качество продукции определяется системой показателей качества, причем ГОСТ 15467–79 устанавливает десять основных групп показателей. Основными из них являются следующие группы:

- технические показатели: скорость, грузоподъемность, точность, жесткость и т.п.;
- технико-экономические показатели: себестоимость, трудоемкость, материалоемкость, коэффициент полезного действия и др.;
- показатели надежности и долговечности: срок службы, наработка на отказ, интенсивность отказов, долговечность и др.;
- показатели безопасности – личной и экологической;
- показатели эргономичности и др.

Система качественных показателей с установленными на них количественными данными и допусками, описывающая служебное назначение машины, называется *техническими условиями и нормами точности на приемку готовой машины*.

*Техническими условиями* ставится задача перед предприятием на проектирование и изготовление машины.

Важнейшим показателем качества машин, достижение и обеспечение которого вызывает наибольшие трудности и затраты в процессе изготовления машин, является точность.

### 3.2.1 Точность деталей и машин

*Под точностью детали или машины понимается степень ее приближения к геометрически правильному ее прототипу [1].* Геометрически правильный прототип изделия задается его чертежами.

Изготовить любое изделие абсолютно точно невозможно, поэтому за меру точности принимаются величины отклонений параметров изделий от значений, заданных геометрически правильным прототипом.

Мерами точности служат, с одной стороны, устанавливаемые конструктором допустимые отклонения от прототипа, или допуски, с другой – действительные отклонения реальной детали, или погрешности.

С этой точки зрения различают нормированную точность и фактическую точность изделия.

Существуют три вида размеров изделий – номинальный, действительный и измеренный.

*Номинальный размер* (по ГОСТ 25346–89) – это размер, относительно которого определяются предельные размеры и который служит началом отсчета отклонений.

*Действительный размер* (по РД 50-635-87) – это размер, полученный в результате выполнения технологического процесса.

*Измеренный размер* (по РД 50-635-87) – это размер изделия, познанный в результате измерения.

Графически это можно представить в виде схемы (рис. 3.4).

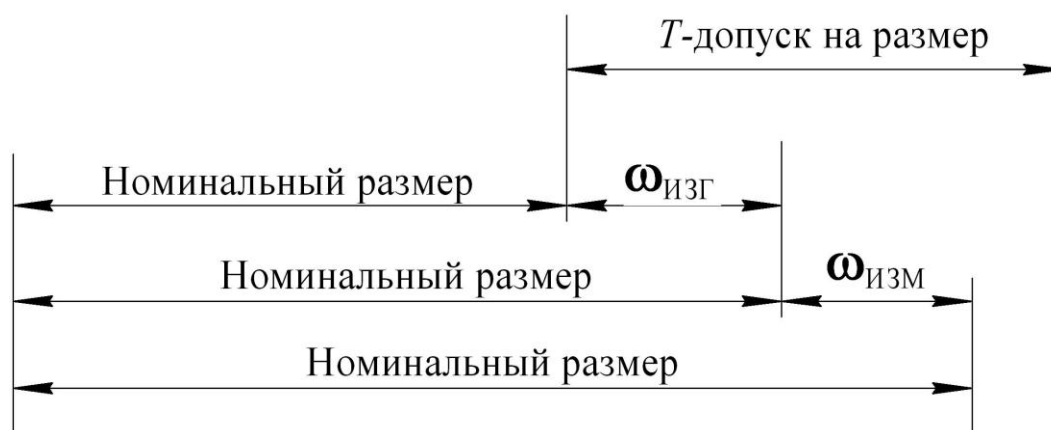


Рис. 3.4 Виды размеров и их погрешности

В результате неизбежной погрешности измерения  $\omega_{\text{изм}}$  величина действительного размера не может быть определена в принципе, поэтому машиностроение оперирует измеренными, а не действительными размерами.

Различают три показателя точности деталей:

1. *Точность размеров* – точность расстояний между какими-либо двумя точками поверхности или поверхностей деталей.

При этом размер понимается как расстояние между двумя небольшими участками поверхностей или одной поверхности, поэтому практически безразлично, от какой из двух поверхностей до другой производится измерение расстояния. В соответствии с этим размер принято изображать двусторонней стрелкой (см. рис. 3.4), острия которой указывают на базы при измерении размера.

Допуски на размеры назначаются исходя из служебного назначения деталей в соответствии с Единой системой допусков и посадок (ЕСДП) по ГОСТ 25346–89 и ГОСТ 25347–2013, полностью соответствующей рекомендациям ИСО. Этими стандартами для размеров до 500 мм установлено 19 квалитетов точности: IT01, IT0, IT1, ..., IT17, где IT – International Tolerance (Международный допуск или допуск ИСО). Самый точный – IT01, самый грубый – IT17. Такая нумерация квалитетов объясняется тем, что первоначально была разработана система допусков для IT1, ..., IT17, и затем, когда потребовалась более высокая точность, чем в IT1, были добавлены квалитеты IT01 и IT0. В машиностроении используются квалитеты с IT6 по IT14. Это объясняется тем, что точнее IT6 размеры средствами машиностроения (станками, другим оборудованием) получить невозможно, а точность размеров грубее IT14 не соответствует требованиям качества машин.

2. *Точность поворота* одной поверхности относительно другой, выбранной за базу.

Под точностью поворота понимается величина отклонения от требуемого углового положения одной поверхности относительно другой в каждой из двух координатных плоскостей. Например, отклонение от параллельности поверхности Б относительно поверхности А – это отклонение от угла поворота поверхности Б в  $180^\circ$  относительно поверхности А (рис 3.5), или откло-

нение от перпендикулярности поверхности В относительно поверхности А – это отклонение от угла поворота поверхности В в  $90^\circ$  относительно поверхности А.

Очевидно, что отклонение от параллельности поверхности Б относительно поверхности А (угловой размер  $\alpha$ ) – это не то же самое, что отклонение от параллельности поверхности А относительно поверхности Б (угловой размер  $\beta$ ). Поэтому при нормировании углового положения поверхностей необходимо указывать, относительно каких поверхностей производится назначение и измерение отклонений их углового положения, т.е. какие поверхности выбираются за базу. В этой связи для обозначения поворотов одной поверхности относительно другой (углового положения) используются односторонние стрелки (см. рис. 3.5), острие которых указывает на базу при нормировании или измерении.

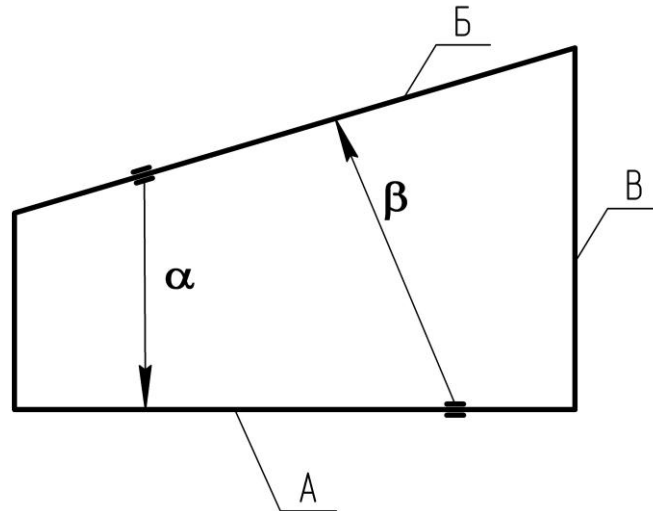


Рис. 3.5 Обозначение угловых размеров

Особенность нормирования и измерения отклонений углового положения поверхностей заключается в том, что в машиностроении не существует точных средств измерения малых углов (каковыми являются эти отклонения), но есть точные средства измерения размеров и расстояний. Поэтому отклонение углового положения поверхностей определяется следующим образом (рис. 3.6).

На поверхности, чье угловое положение требуется определить (поверхность А), выбираются две точки на расстоянии  $L$  друг от друга. В этих точках определяется расстояние от контролируемой поверхности А до базы (поверхность Б)  $\hat{a}_1$  и  $\hat{a}_2$ . Отклонение углового положения поверхности А относительно поверх-

ности Б (в данном примере отклонение от параллельности) определяется отношением

$$\operatorname{tg}\alpha = \frac{a_2 - a_1}{L},$$

где  $\alpha$  – отклонение от угла в  $180^\circ$  положения поверхности А относительно поверхности Б.

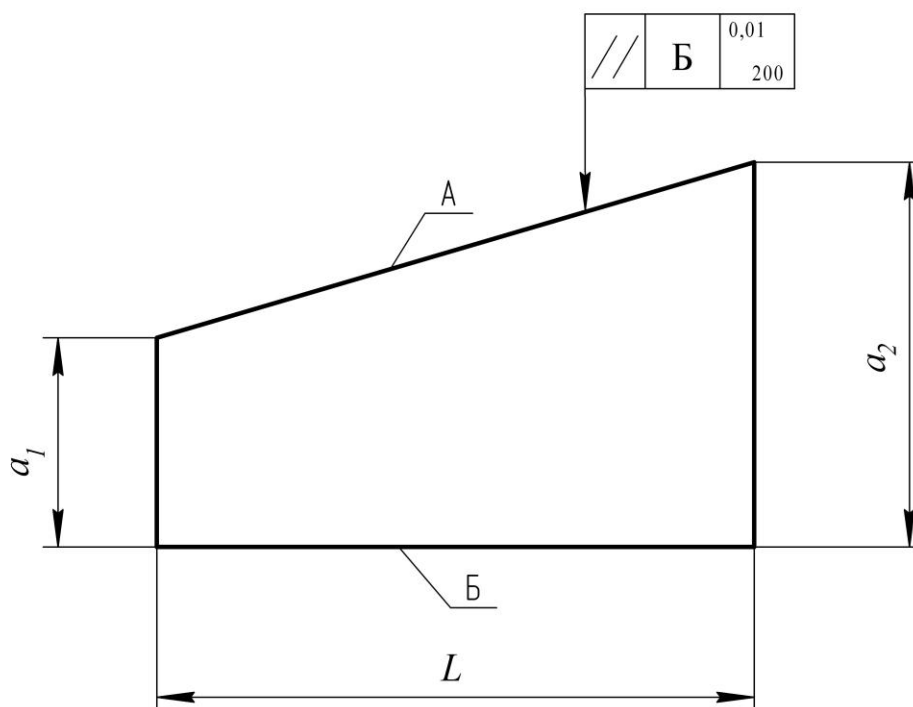


Рис. 3.6 Нормирование точности углового положения поверхностей

Для упрощения задачи (чтобы не переводить тангенс в величину углового отклонения) на чертеже детали записывается техническое требование. Например, если  $(a_2 - a_1)$  не должно превышать 0,01 мм на длине  $L = 200$  мм, это требование выглядит так: *допустимое отклонение от параллельности (или любого другого угла) не более 0,01 мм на длине 200 мм (можно на всей длине)*. Это требование может быть показано на чертеже детали условным значком (см. рис. 3.6).

3. *Точность геометрических форм* поверхностей деталей – характеризуется отклонением формы реальной поверхности от ее геометрического представления.

Различают три вида отклонений формы поверхностей деталей:

а) *макрогеометрические отклонения* – это отклонения реальной поверхности от правильной геометрической формы в пределах габаритных размеров этой поверхности, например отклонения от круглости, от цилиндричности цилиндрических поверхностей, отклонения от плоскостности, от прямолинейности плоских поверхностей и т.п. В соответствии с ГОСТ 24643–81 на макрогеометрические отклонения формы поверхностей назначаются допуски в зависимости от степени точности изделия. Всего по стандарту принято 11 степеней точности: самая точная 1-я степень, самая грубая – 11-я;

б) *волнистость* – это совокупность периодически повторяющихся неровностей с относительно большими шагами. Волнистость не регламентируется стандартами, поскольку волнистость поверхностей на обработанных деталях машин не допускается, за исключением случаев, когда волнистость необходима в соответствии с требованиями служебного назначения детали. В этих случаях параметры волнистости определяются техническими требованиями на деталь;

в) *шероховатость* – это совокупность неровностей поверхности с относительно малыми шагами на базовой длине. *Базовой длиной* называется длина базовой линии, используемой для выделения неровностей, характеризующих шероховатость поверхности, и для количественного определения ее параметров. Показатели шероховатости поверхности регламентируются ГОСТ 2789–73 с дополнениями.

В ряде случаев шероховатость рассматривается не как характеристика отклонения формы поверхности, а как один из параметров качества поверхностного слоя деталей. Поэтому вопросы, связанные с показателями шероховатости поверхности и их нормированием, будут рассмотрены в разделе 6.

Между всеми перечисленными показателями точности существуют качественные связи.

Так, не зная макроотклонений формы поверхности, трудно судить об отклонениях углового положения поверхности относительно базы, поскольку при определении истинного углового положения поверхности макроотклонения ее формы будут влиять на величину отклонения углового положения.

Трудно также говорить о точности расстояния между двумя поверхностями, так как на измеренное отклонение размера окажут влияние отклонения углового положения и формы поверхности.

Отсюда следует, что:

– во-первых, контроль точности детали должен начинаться с определения макрогеометрических отклонений формы поверхностей, затем должны измеряться отклонения от требуемого углового положения поверхностей и, наконец, точность расстояний или размеров;

– во-вторых, различные машины и детали изготавливаются в различных количествах в единицу времени;

– в-третьих, допуски на расстояния и размеры детали должны быть больше допусков на величины отклонений углового положения поверхностей, которые, в свою очередь, должны быть больше допусков на макрогеометрические отклонения формы поверхностей детали.

Так как исполнительные поверхности должны совершать относительные движения, необходимые для выполнения машиной своего служебного назначения, одним из основных показателей точности 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.

Характер движения исполнительных поверхностей определяется траекторией их движения, скоростями и ускорениями. Следовательно, точность относительного движения характеризуется величиной отклонений этих показателей от заданных значений, и на эти отклонения также должны устанавливаться допуски.

Таким образом, точность машины характеризуется следующими основными показателями:

1) точностью относительного движения исполнительных поверхностей машины;

2) точностью расстояний между исполнительными поверхностями машины и их размерами;



3) точностью относительных поворотов исполнительных поверхностей машины;

4) точностью геометрических форм исполнительных поверхностей машины.

### 3.3 Техничко-экономические показатели изготовления машины

Основным технико-экономическим показателем изготовления машины является ее себестоимость.

*Себестоимость* – это затраты живого и овеществленного труда на изготовление машины, выраженные в денежной форме.

Подсчет себестоимости называется *калькуляцией*. Различают два типа калькуляции:

- предварительная;
- фактическая.

Предварительная калькуляция производится для определения плановой себестоимости и для выбора наиболее экономичного варианта технологического процесса.

Фактическая калькуляция – это расчет фактических затрат на изготовление машины.

Существует два принципиально различных метода калькуляции:

#### 1. Бухгалтерский метод.

Себестоимость  $C$  подсчитывается по формуле

$$C = \sum_{i=1}^I M_i + \sum_{j=1}^J \left(1 + \frac{a_1 + a_2}{100}\right) \cdot Z_j,$$

где  $\sum_{i=1}^I M_i$  – расходы на материалы на единицу продукции:  $i$  – номер материала,  $I$  – количество различных материалов,  $M_i$  – стоимость  $i$ -го материала;

$\sum_{j=1}^J \left(1 + \frac{a_1 + a_2}{100}\right) \cdot Z_j$  – расходы на заработную плату основных рабочих:  $j$  – номер операции,  $J$  – количество операций по изготовлению единицы продукции,  $a_1$  – процент начислений на расходы по заработной плате на социальные отчисления,  $a_2$  – процент накладных расходов, начисляемых на расходы по заработной плате основных рабочих,  $Z_j$  – расходы на заработную плату основных рабочих на  $j$ -й операции.

Недостаток этого метода – невозможность установления влияния отдельных технологических факторов на себестоимость машины, его достоинство – простота калькуляции.

2. Метод локального или раздельного начисления расходов.

Себестоимость  $C$  определяется по формуле

$$C = \sum_{i=1}^I M_i + \sum_{j=1}^J \left[ O_j + П_j + И_j + \left( 1 + \frac{a_1 + a_3}{100} \right) \cdot З_j \right],$$

где  $\sum_{i=1}^I M_i$  – расходы на материалы на единицу продукции;  $a_3$  – процент накладных расходов, начисленных на расходы по зарплате. Он отличается от коэффициента  $a_2$  тем, что сюда не включаются расходы на амортизацию и содержание оборудования, приспособлений и инструмента;  $O_j$  – расходы на амортизацию и содержание оборудования, приходящиеся на единицу продукции;  $П_j$  – расходы на амортизацию и содержание приспособлений и другой технологической оснастки, приходящиеся на единицу продукции;  $И_j$  – расходы на амортизацию и содержание инструмента, приходящиеся на единицу продукции.

Недостаток этого метода калькуляции – большая трудоемкость определения себестоимости. Достоинство этого метода заключается в том, что он позволяет выявить характер влияния отдельных производственных факторов на себестоимость машины и, следовательно, определить пути снижения затрат.

Второй важный технико-экономический показатель изготовления машины – ее трудоемкость.

*Трудоемкость* – это количество времени, затраченное рабочим определенной квалификации на изготовление единицы продукции, выполнение операции, перехода. Единицей измерения трудоемкости служит *человеко-час*. Следовательно, трудоемкость представляет собой затраты только живого труда – рабочего времени и является одним из элементов себестоимости.

## 4 ОСНОВЫ ДОСТИЖЕНИЯ КАЧЕСТВА МАШИНЫ

### 4.1 Основные понятия теории размерных цепей

В общем случае, совокупность размеров, образующих замкнутый контур и непосредственно участвующих в решении поставленной задачи называется *размерной цепью* (рис. 4.1).

Размеры, образующие размерную цепь, называются *звеньями размерной цепи*.

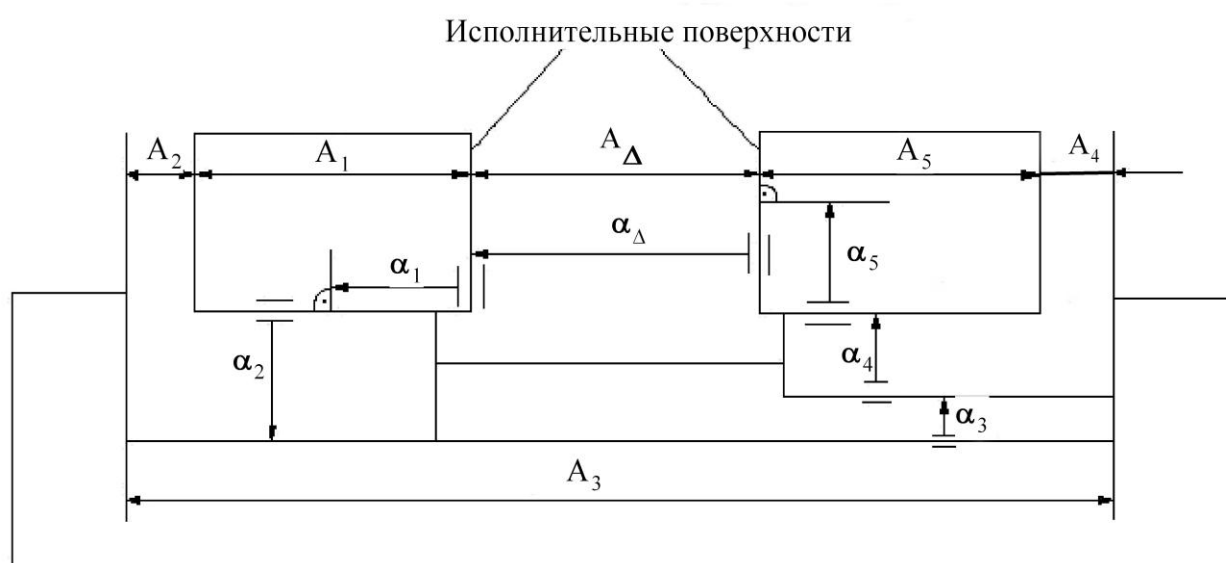


Рис. 4.1 Линейная ( $A$ ) и угловая ( $\alpha$ ) размерные цепи

Например, при изготовлении некой машины (см. рис. 4.1) поставлена *задача* – получить расстояние  $A_\Delta$  между исполнительными поверхностями и отклонение от параллельности  $\alpha_\Delta$  одной исполнительной поверхности относительно другой в пределах заданных значений.

Следовательно, размерные цепи бывают двух видов:

- *линейные* – размерные цепи, звеньями которых являются линейные размеры (цепь  $A$ );
- *угловые* – размерные цепи, звеньями которых являются угловые размеры (цепь  $\alpha$ ) – отклонения от параллельности и перпендикулярности поверхностей.

Различают следующие виды звеньев размерных цепей.

*Замыкающее звено* – это звено размерной цепи, являющееся исходным при постановке задачи или получающееся последним в результате ее решения.

Так, в рассматриваемом примере (см. рис. 4.1) линейный размер  $A_{\Delta}$  и угловой размер  $\alpha_{\Delta}$  служат исходными при постановке задачи изготовления машины. Их величины и предельные отклонения назначаются исходя из служебного назначения машины, затем строятся размерные цепи и назначаются допуски на звенья размерных цепей.

При изготовлении машины в процессе соединения ее деталей (сборки) размеры  $A_{\Delta}$  и  $\alpha_{\Delta}$  получатся последними.

Следовательно, размеры  $A_{\Delta}$  и  $\alpha_{\Delta}$  – замыкающие звенья размерных цепей. Эти звенья в размерных цепях принято обозначать индексом  $\Delta$ .

*Составляющее звено* – это звено размерной цепи, функционально связанное с замыкающим звеном.

Различают увеличивающие и уменьшающие составляющие звенья размерных цепей.

*Увеличивающее звено* – это составляющее звено размерной цепи, с увеличением которого замыкающее звено увеличивается.

*Уменьшающее звено* – это составляющее звено размерной цепи, с увеличением которого замыкающее звено уменьшается.

Так, в размерной цепи  $A$  звено  $A_3$  является увеличивающим, так как при его увеличении звено  $A_{\Delta}$  увеличивается. Остальные звенья этой размерной цепи являются уменьшающими, поскольку с увеличением каждого из них замыкающее звено  $A_{\Delta}$  уменьшается. Характер составляющего звена обозначается следующим образом:  $A_3^{\rightarrow}$  – увеличивающее звено;  $A_1^{\leftarrow}$  – уменьшающее звено.

*Компенсирующее звено* – это составляющее звено размерной цепи, изменением которой достигается требуемая точность замыкающего звена. В рассматриваемом примере (см. рис. 4.1) требуемая точность замыкающего звена  $\hat{A}_{\Delta}$  может быть не достигнута при сборке. В этом случае одна из деталей может быть извлечена из машины (частичной разборкой) и ее размер может быть изменен на требуемую величину тем или иным способом. В этом слу-

чае изменяемый размер такой детали, входящий в размерную цепь, будет являться компенсирующим звеном. В размерной цепи компенсирующее звено заключается в прямоугольную рамку.

*Общее звено* – это звено, одновременно принадлежащее нескольким размерным цепям.

Различают следующие виды размерных цепей.

*Основная размерная цепь* – цепь, замыкающим звеном которой является размер, обеспечиваемый в соответствии с решением основной задачи.

*Производная размерная цепь* – цепь, замыкающим звеном которой является одно из составляющих звеньев основной размерной цепи (рис. 4.2).

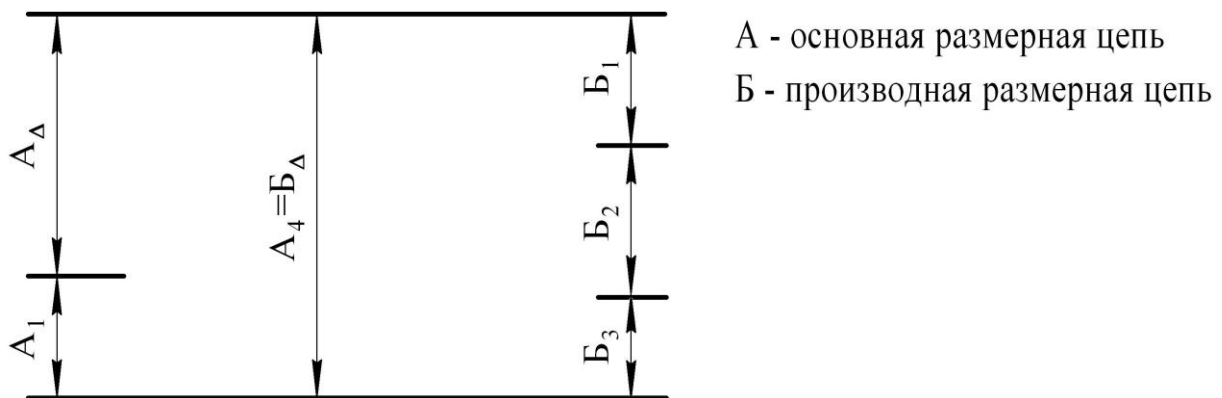


Рис. 4.2. Основная и производная размерные цепи

В зависимости от решаемой задачи различают следующие размерные цепи.

*Конструкторская размерная цепь* – это цепь, определяющая расстояние или относительный поворот между поверхностями или осями поверхностей деталей в изделии. При помощи этих цепей решаются задачи обеспечения точности изделия при конструировании.

*Технологическая размерная цепь* – это цепь, обеспечивающая требуемое расстояние или относительный поворот между поверхностями изготавливаемого изделия при выполнении операций сборки, механической обработки, при настройке станка или при расчете межпереходных размеров.

*Измерительная размерная цепь* – это цепь, возникающая при определении расстояния или относительного поворота между

поверхностями или их осями изготавливаемого или изготовленного изделия.

Любое изделие содержит большое количество размерных цепей, связанных между собой.

Существуют размерные цепи с параллельной, последовательной и комбинированной связью.

*Параллельно связанные размерные цепи* – это цепи, имеющие одно или несколько общих звеньев (рис. 4.3).

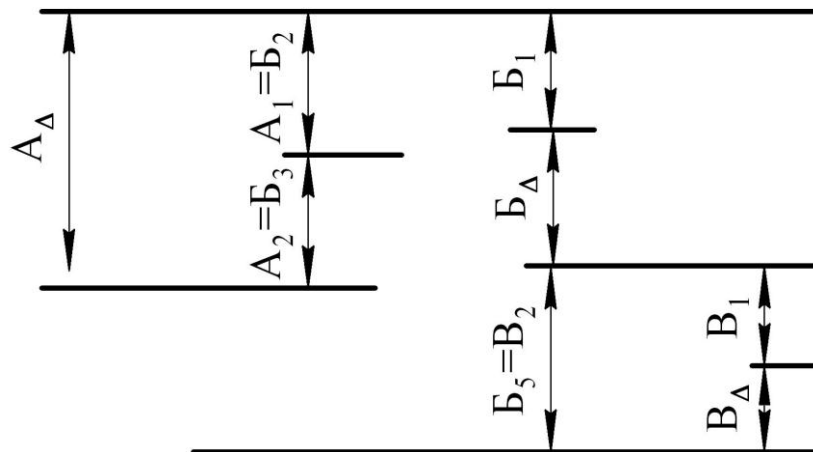


Рис. 4.3. Параллельно связанные размерные цепи

Последовательно связанные размерные цепи – это цепи, из которых каждая последующая имеет одну общую базу с предыдущей (рис. 4.4).

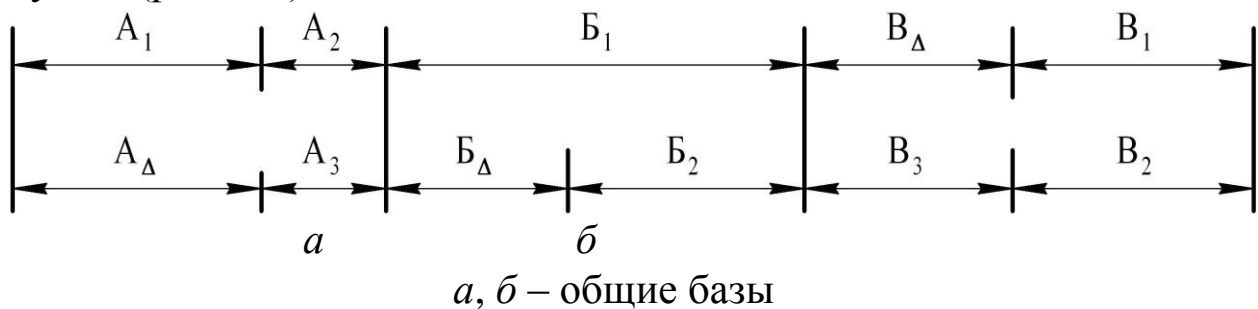


Рис. 4.4. Последовательно связанные размерные цепи

*Размерные цепи с комбинированной связью* – это цепи, между которыми имеются параллельные и последовательные связи.

Наконец, размерные цепи бывают плоские и пространственные.

*Плоская размерная цепь* – это цепь, звенья которой расположены в одной или нескольких параллельных плоскостях (см. рис. 4.4).

*Пространственная размерная цепь* – это цепь, звенья которой расположены в непараллельных плоскостях (рис. 4.5).

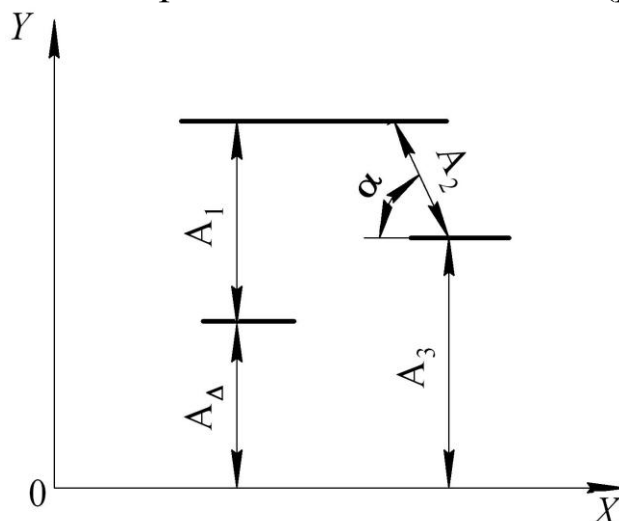


Рис. 4.5 Пространственная размерная цепь

*Уравнение размерной цепи:* величина замыкающего звена размерной цепи равна **алгебраической сумме** величин составляющих звеньев, где величины *увеличивающих звеньев* принимаются со знаком «+», а величины *уменьшающих звеньев* со знаком «-»:

$$A_{\Delta} = \sum_{i=1}^I A_i,$$

где  $i$  – номер составляющего звена.

## 4.2 Статистические методы исследования технологических процессов

В ходе любого технологического процесса участвует большое количество факторов – станки, приспособления, инструмент, заготовки, рабочая среда.

Степень влияния факторов постоянно меняется, причем не существует возможности контролировать эти изменения постоянно. В результате детали, изготовленные на настроенном станке, имеют различные показатели точности. Так, каждая деталь, обработанная в партии на настроенном станке, будет иметь свой размер, и в партии деталей, обработанных на настроенном станке,





Точечная диаграмма имеет две характеристики.

*Поле рассеивания* показателя качества (размера детали) определяется как разность максимального и минимального значения показателя качества изделия. В рассматриваемом примере (см. рис. 4.6) поле рассеивания размеров определяется как разность максимального  $D_{max}$  и минимального  $D_{min}$  размеров в партии годных деталей

$$\omega = D_{max} - D_{min}.$$

*Мгновенное поле рассеивания*  $\omega_T$  определяется как ширина условной полосы, в которой расположены точки-размеры точечной диаграммы (см. рис. 4.6). Следует отметить, что точечная диаграмма носит дискретный характер и в каждый момент времени существует определенный размер конкретной детали, однако для удобства анализа технологических процессов вводится понятие *мгновенного поля рассеивания*.

Другой характеристикой явления рассеивания служит практическая кривая рассеивания параметра качества и определяющие ее параметры.

Построение кривой рассеивания величины какой-либо характеристики качества, например, размера производится следующим образом.

1. Обрабатывается партия деталей на настроенном станке. Например, токарный станок настроен на обработку валиков  $\varnothing 64,90$  мм. Обработана партия в количестве 51 детали. В теории вероятностей партия называется «выборка». У каждой детали в партии измеряется параметр качества – диаметр. Предположительно, в партии деталей разброс диаметров получился в пределах от  $\varnothing 64,80$  до  $\varnothing 65,05$  мм.

2. По полученным данным определяется общее поле рассеивания:

$$\omega = D_{max} - D_{min}.$$

В примере  $\omega = 65,05 - 64,80 = 0,25$  мм.

3. Поле рассеивания делится на несколько равных интервалов  $I$ .

Количество интервалов выбирается в зависимости от общего количества изделий, так, чтобы в каждый интервал попало достаточное количество измеренных величин.

Результаты измерений и деления на интервалы сводятся в табл. 4.1, представленную ниже.

Таблица 4.1

Результаты измерений и деления на интервалы

Интервалы, мм	Количество деталей, попадающих своими размерами в данный интервал, шт.
64,80–64,85	3
64,85–64,90	9
64,90–64,95	20
64,95–65,00	17
65,00–65,05	2

На основании этой таблицы строится график (рис. 4.7).

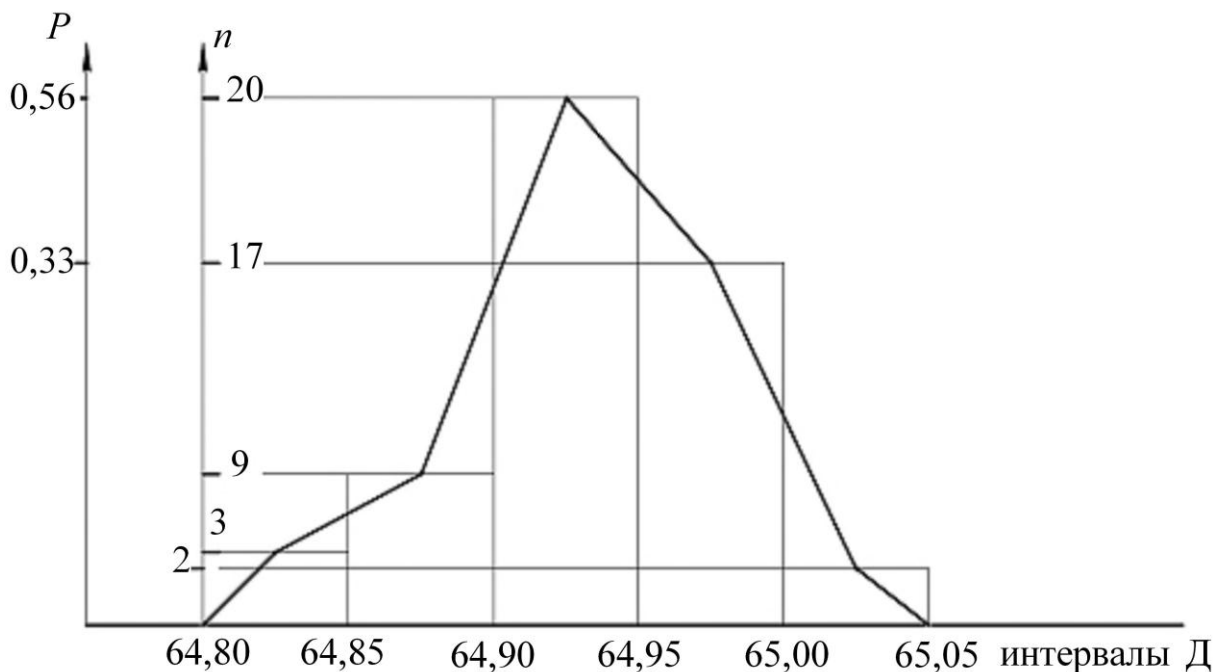


Рис. 4.7. Практическая кривая рассеивания размеров

По горизонтальной оси откладываются величины интервалов, по вертикальной оси – количество деталей, попадающих своими размерами в каждый интервал. Полученный набор колонок называется «гистограмма». Для устранения проблем, связанных со сравнением масштабов гистограмм различных параметров, удобнее по вертикальной оси откладывать не количество деталей, а *вероятность* появления размера каждой детали в заданном интервале:

$$p(X_i) = n(X_i)/N,$$

где  $n(X_i)$  – количество деталей, попадающих своими размерами  $X_i$  в интервал  $i$ ;  $N$  – общее количество деталей в партии – объем выборки.

Если соединить прямыми линиями середины прямоугольников, получится ломаная кривая, которая называется «полигон». Это и есть практическая кривая рассеивания размеров. Если увеличивать число деталей в выборке и сокращать величину интервалов, ломаная кривая фактического распределения перейдет в плавную кривую теоретического распределения, которая может быть описана математическим уравнением:

$$p = \varphi(X).$$

Эта зависимость называется законом распределения, или законом рассеивания случайной величины (см. рис. 4.7).

Характеристиками кривой рассеивания служат:

1. Математическое ожидание случайной величины. В технологии машиностроения его называют центром группирования.

Центром группирования или центром рассеивания случайной величины называется ее среднее значение, около которого располагаются в основном все ее остальные значения.

Центр группирования практической кривой рассеивания

$$M(X) = \sum_{i=1}^l X_i p(X_i),$$

где  $X_i$  – текущее значение случайной величины (размера), или значение середины каждого интервала  $i$ ;  $p(X_i)$  – вероятность появления величины  $X_i$  в интервале  $i$ .

Для теоретической кривой рассеивания

$$M(X) = \int_{-\infty}^{+\infty} X \cdot \varphi(X) dX,$$

где  $\varphi(X)$  – теоретический закон распределения величины  $X$ .

2. Среднеквадратическое отклонение – мера рассеивания случайной величины  $X$  относительно центра группирования.

Для практической кривой рассеивания среднеквадратическое отклонение определяется по формуле

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^I [X_i - M(X)]^2 p(X_i)}.$$

Для теоретической кривой рассеивания

$$\sigma = \sqrt{\int_{-\infty}^{+\infty} [X_i - M(X)]^2 \varphi(X) dX}.$$

Рассеивание большинства случайных величин в технологии машиностроения подчиняется закону нормального распределения, или закону Гаусса.

Закон нормального распределения будет наблюдаться в случае выполнения следующих условий:

- достаточно большой объем выборки;
- случайные величины не зависят друг от друга;
- степень влияния случайных факторов равноценна.

Закон нормального распределения описывается выражением

$$Y = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{X^2}{2\sigma^2}}.$$

Теоретическая кривая нормального распределения представлена на рис. 4.8.

Теоретическая кривая простирается в обе стороны до бесконечности, асимптотически приближаясь к оси  $X$ .

Для практических расчетов ограничиваются диапазоном изменения случайной величины  $X = \pm 3\sigma$  ( $6\sigma$ ).

При этом только 0,54 % случайных величин выходят за эту область.

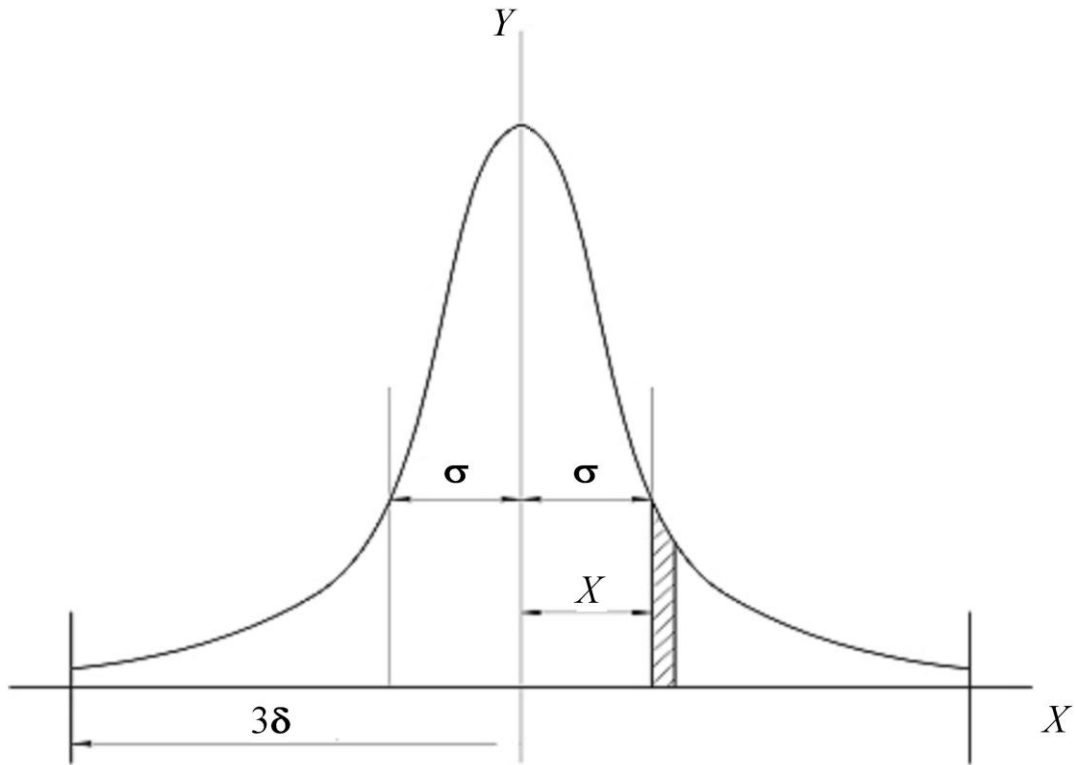


Рис. 4.8. Теоретическая кривая нормального распределения

Площадь графика (см. рис. 4.8) на расстоянии  $x$  от оси ординат (заштрихована) определяет в процентном отношении количество деталей, попадающих своими размерами в этот интервал. Таким образом, бóльшая часть деталей будет иметь размеры, близкие к центру группирования.

Кроме закона Гаусса в технологии машиностроения действуют и другие законы распределения.

Самые распространенные из них – закон равной вероятности (рис. 4.9, а) и закон Симпсона (рис. 4.9, б).

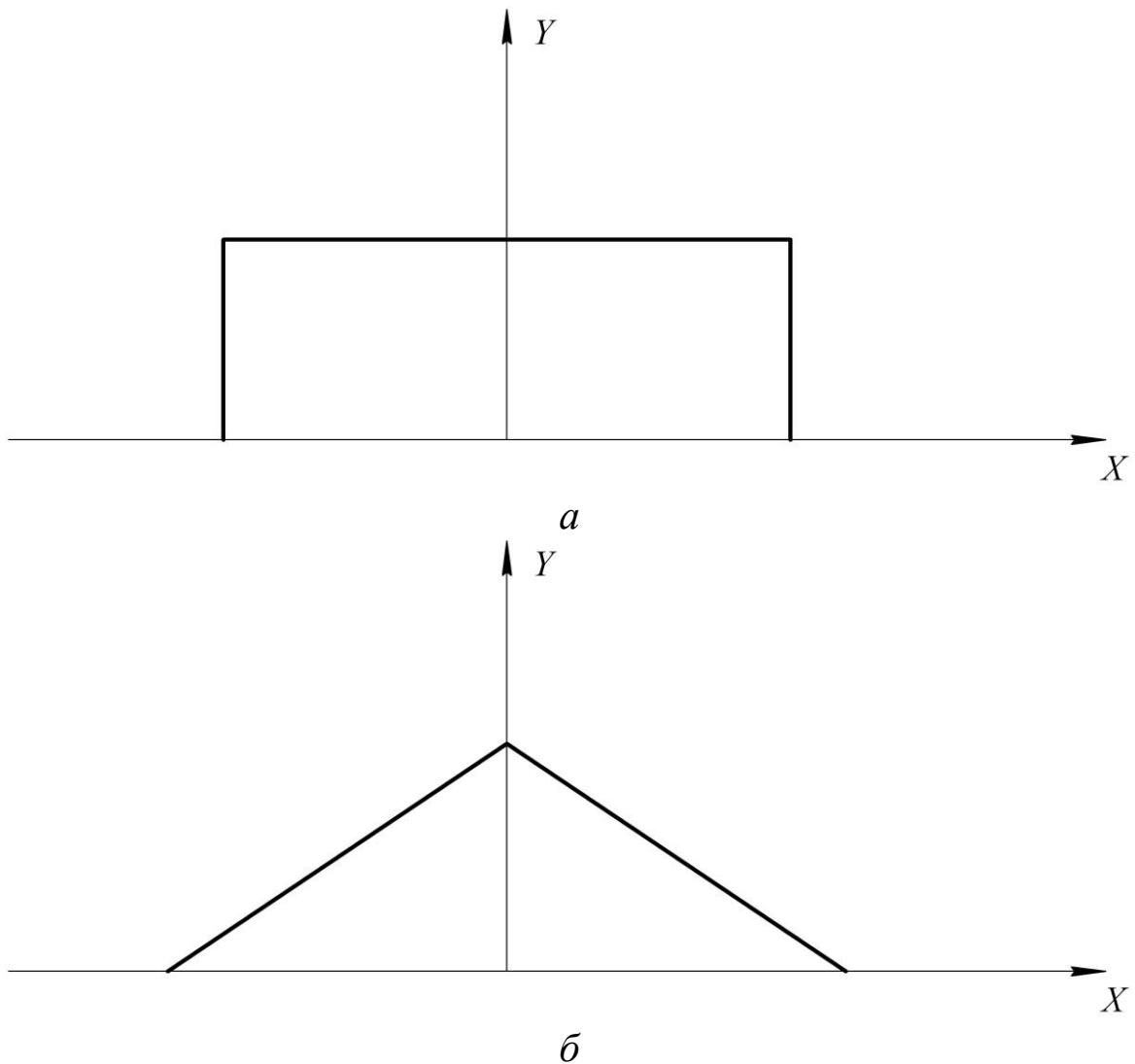


Рис. 4.9. Законы распределения случайных величин:  
 $a$  – закон равной вероятности;  $б$  – закон Симпсона

#### 4.2.1 Влияние действия отдельных факторов на изменение характеристик качества изделий

Как было сказано, закон Гаусса действует в случае, когда в процессе изготовления детали действует множество независимых факторов и сила их воздействия примерно одинакова.

На практике, как правило, одни факторы действуют сильнее, т.е. являются доминирующими, другие действуют слабее.

В результате реальные кривые рассеивания, как правило, значительно отличаются от закона Гаусса.

Это искажение кривых рассеивания зависит от того, какого вида фактор является доминирующим.

Все факторы, действующие в процессе обработки, можно разделить на три вида.

1. Систематические постоянно действующие, например, отклонение от перпендикулярности оси шпинделя к поверхности стола сверлильного станка. Эти факторы действуют постоянно в процессе обработки всех деталей и вызывают постоянные по величине погрешности, которые могут быть выявлены пробными измерениями нескольких деталей.

Действие этих факторов можно свести к минимуму соответствующими технологическими мероприятиями.

2. Систематические закономерно изменяющиеся факторы могут влиять на точность обработки непрерывно или периодически.

Пример такого фактора – размерный износ режущего инструмента. Всегда есть возможность определить закон изменения этого фактора и предсказать величину вызываемой им погрешности в каждый момент времени.

3. Случайные факторы, действие которых нельзя предсказать заранее. Следовательно, погрешности, вызываемые этими факторами, невозможно предсказать. Пример таких факторов – твердость металла заготовки, колебания толщины снимаемого слоя материала.

Если доминирующей является систематическая постоянная погрешность, то кривая рассеивания сдвигается на величину этой погрешности по оси абсцисс. Форма кривой рассеивания не меняется. Например, рабочий, обработав половину партии втулок, заменил затупившееся сверло на другое, диаметром на 0,5 мм больше, но не заметил этого и обработал этим сверлом другую половину партии. В результате диаметры отверстий всех втулок второй половины партии увеличились по сравнению с диаметрами отверстий втулок первой половины партии на 0,5 мм [1]. В результате центр группирования размеров (математическое ожидание) практической кривой рассеивания сместится на величину  $\tilde{N} = 0,5$  мм (рис. 4.10).

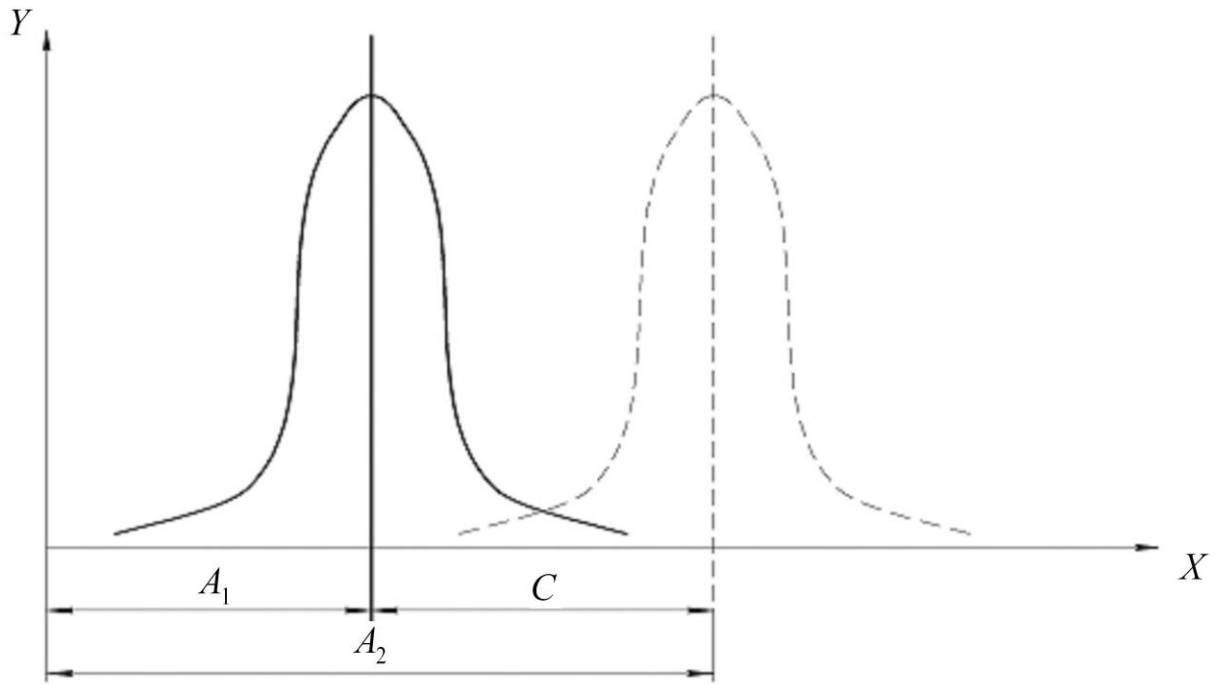


Рис. 4.10. Влияние постоянно действующего фактора на кривую рассеивания

Если доминирующей является систематическая изменяющаяся по определенному закону погрешность, кривая рассеивания представляет собой сочетание закона распределения Гаусса с законом изменения доминирующей погрешности.

Например, при обработке партии валиков на токарном станке наряду с действием большого количества независимых факторов одного порядка доминирующим фактором является размерный износ инструмента. В результате среднее значение диаметра валиков по мере увеличения их порядкового номера будет непрерывно возрастать по мере износа резца, несмотря на отклонения размеров отдельных валиков от этой средней величины в результате действия других факторов. Кривая рассеивания будет представлять собой сочетание закона нормального распределения и закона изнашивания режущей кромки резца (рис. 4.11).

Если доминирующим является случайный фактор, это приводит:

- к расширению поля рассеивания характеристик качества детали;
- к непредсказуемому искажению кривой рассеивания.



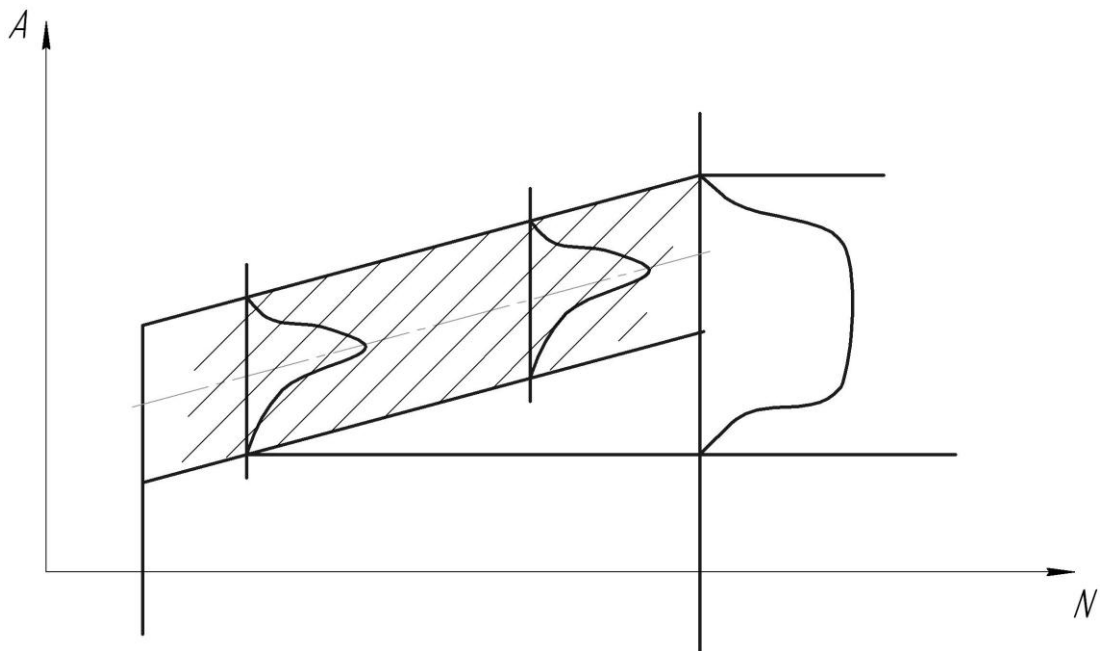


Рис. 4.11. Влияние систематически изменяющегося фактора на кривую рассеивания

Пример такого фактора – значительное колебание твердости заготовок (рис. 4.12).

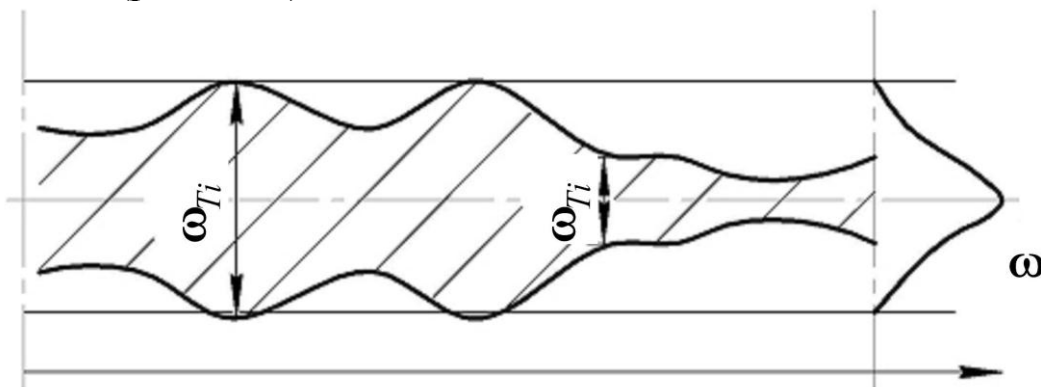


Рис. 4.12. Влияние случайного фактора на кривую рассеивания

В ряде случаев систематические факторы могут превращаться в случайные, и наоборот. Так, если в примере с обработкой втулок различными сверлами (см. рис. 4.10) перемешать детали из обеих частей партии и затем производить измерение диаметров их отверстий, будет получена одна кривая нормального распределения с широким полем рассеивания размеров. В этом случае систематический постоянно действующий фактор – диаметр сверла превращается в случайный.

При обработке деталей действует большое число непрерывно меняющихся факторов, поэтому точечные диаграммы и кривые распределения показателей качества деталей могут иметь самый различный вид.

Таким образом, основными характеристиками явления рассеяния партии изделий являются (рис. 4.13):

1. Величина поля рассеивания  $\omega$ ;
2. Положения поля рассеивания  $\omega$  относительно номинальной величины  $A_n$  размера, которое определяется координатой середины поля рассеивания  $\Delta_\omega$ ;

3. Величина среднего значения (координата центра группирования)  $M(x)$  отклонений от номинальной величины;

4. Параметры, характеризующие кривую рассеяния:

- среднеквадратическое отклонение  $\sigma$ ;

- коэффициент относительной асимметрии  $\alpha$

$$\alpha = \frac{M(X) - \Delta_\omega}{\omega/2};$$

- коэффициент относительного рассеивания  $\lambda$

$$\lambda = \frac{\sigma}{\omega/2},$$

показывающий степень приближения данного закона распределения к нормальному.

Расчет всех этих параметров лежит в основе статистического метода исследования технологических процессов.

Этот метод позволяет:

- объективно оценить точность различных способов механической обработки;

- проверить результаты аналитических расчетов;

- выявить количественные и качественные зависимости точности обработки от отдельных технологических факторов;

- объективно оценить точность выполнения данной технологической операции.

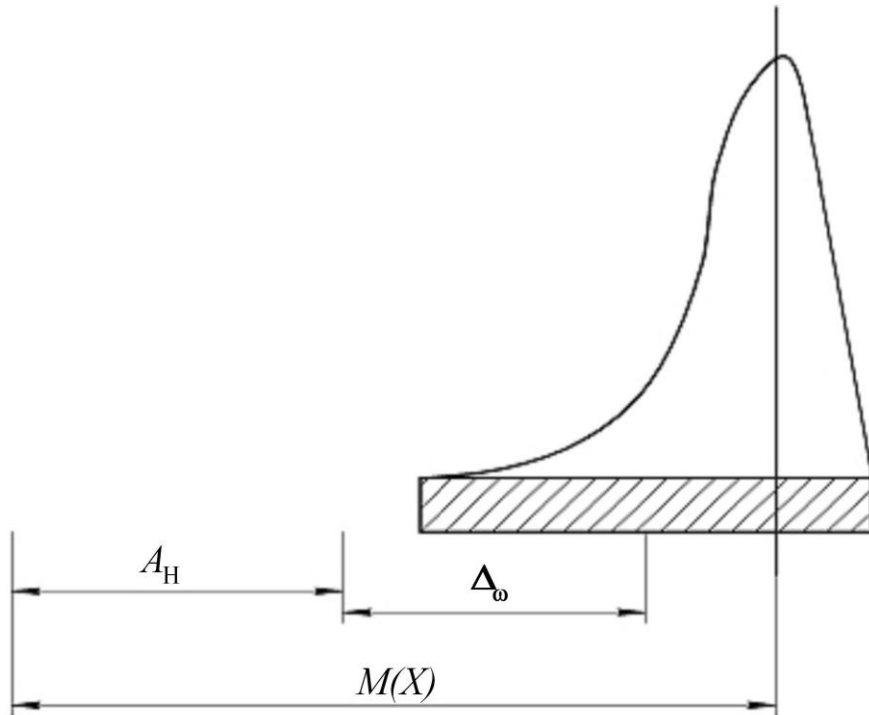


Рис. 4.13. Основные характеристики рассеивания

Метод прост, универсален, оснащен проработанным математическим аппаратом и программным обеспечением для ЭВМ (пакет прикладных программ «Статистика»). Метод удобен, когда не изучен механизм явлений, происходящих при обработке детали, неизвестны причины возникновения погрешностей.

Вместе с тем, метод не вскрывает сущность физических явлений и факторов, влияющих на точность обработки, не выявляются конкретные возможности повышения точности. Метод обращен в прошлое, т.е. фиксирует результаты прошедшего этапа, и не предсказывает, что будет с точностью в будущем. Указанные недостатки ограничивают возможности его применения.

#### 4.3 Погрешность замыкающего звена размерной цепи Любая размерная цепь может быть описана уравнением

$$A_{\Delta} = f(A_1, A_2, \dots, A_m),$$

где  $A_{\Delta}$  – замыкающее звено размерной цепи,  $A_1, A_2, \dots, A_m$  – составляющие звенья размерной цепи [1, 2, 3].

Полный дифференциал этой функции

$$dA_{\Delta} = \frac{\partial A_{\Delta}}{\partial A_1} dA_1 + \frac{\partial A_{\Delta}}{\partial A_2} dA_2 + \dots + \frac{\partial A_{\Delta}}{\partial A_m} dA_m.$$

Учитывая, что дифференциал – это малое конечное приращение переменных, и рассматривая малые приращения размеров  $A_{\Delta}, A_1, A_2, \dots, A_m$  как погрешности этих размеров, т.е.

$$dA_{\Delta} = \omega_{A_{\Delta}}, dA_1 = \omega_{A_1}, dA_2 = \omega_{A_2}, \dots, dA_m = \omega_{A_m},$$

можно записать:

$$\omega_{A_{\Delta}} = \frac{\partial A_{\Delta}}{\partial A_1} \cdot \omega_{A_1} + \frac{\partial A_{\Delta}}{\partial A_2} \cdot \omega_{A_2} + \dots + \frac{\partial A_{\Delta}}{\partial A_m} \cdot \omega_{A_m},$$

или

$$\omega_{A_{\Delta}} = \sum_{m=1}^M \frac{\partial A_{\Delta}}{\partial A_m} \cdot \omega_{A_m},$$

где  $\omega_{A_{\Delta}}$  – погрешность (поле рассеивания) замыкающего звена размерной цепи;  $\omega_{A_m}$  – погрешность (поле рассеивания) составляющего звена с индексом  $m$ ;

$\frac{\partial A_{\Delta}}{\partial A_m}$  – численные выражения частных производных, называемых передаточными отношениями звеньев размерной цепи, которые определяют степень влияния погрешности каждого из составляющих звеньев на величину погрешности (поля рассеивания) замыкающего звена.

Для плоских размерных цепей с параллельно расположенными звеньями величина каждой из частных производных равна единице, т.е.

$$\frac{\partial A_{\Delta}}{\partial A_1} = 1, \frac{\partial A_{\Delta}}{\partial A_2} = 1, \dots, \frac{\partial A_{\Delta}}{\partial A_m} = 1,$$

следовательно

$$\omega_{A_{\Delta}} = \omega_{A_1} + \omega_{A_2} + \dots + \omega_{A_m} = \sum_{m=1}^M \omega_{A_m}.$$

Из этой формулы следует, что *при изготовлении партии деталей или сборке партии изделий поле рассеивания замыкающего звена плоской размерной цепи с параллельно расположенными звеньями равно арифметической сумме величин полей рассеивания всех составляющих звеньев.*

Поскольку координаты середины полей рассеивания имеют не только величину, но и знак, *координата середины поле рассеивания  $\Delta_{\omega_{\Delta}}$  замыкающего звена плоской размерной цепи с параллельными звеньями равна алгебраической сумме координат середин полей рассеивания всех составляющих звеньев:*

$$\Delta_{\omega_{\Delta}} = \sum_{n=1}^N \bar{\Delta}_{\omega_n} - \sum_{m=1}^M \bar{\Delta}_{\omega_m} .$$

Здесь  $\sum_{n=1}^N \bar{\Delta}_{\omega_n}$  – сумма координат середин полей рассеивания увеличивающих составляющих звеньев размерной цепи;  $\sum_{m=1}^M \bar{\Delta}_{\omega_m}$  – сумма координат середин полей рассеивания уменьшающих составляющих звеньев размерной цепи.

Из анализа формулы

$$\omega_{A_{\Delta}} = \sum_{m=1}^M \frac{\partial A_{\Delta}}{\partial A_m} \omega_{A_m}$$

следует, что повышение точности замыкающего звена в партии изделий при обработке или сборке может быть достигнуто тремя путями:

- уменьшением поля рассеивания  $\omega_{A_m}$  или, другими словами, увеличением точности каждого из составляющих звеньев размерной цепи, что приведет к увеличению затрат на производство;
- уменьшением величины передаточных отношений  $\frac{\partial A_{\Delta}}{\partial A_m}$

каждого из составляющих звеньев, то есть за счет уменьшения степени влияния составляющих звеньев на точность замыкающего звена;

- сокращением количества  $t$  составляющих звеньев размерной цепи. Этот способ называется принципом наикратчайшего пути. Его сущность сводится к тому, что *наибольшая (при всех прочих равных условиях) точность может быть достигнута с помощью размерных или кинематических цепей, содержащих наименьшее количество звеньев.*

## 4.4 Методы достижения точности замыкающего звена размерной цепи

### 4.4.1 Метод полной взаимозаменяемости

*Сущность метода заключается в том, что требуемая точность замыкающего звена размерной цепи достигается каждый раз включением в нее составляющих звеньев без их выбора, подбора или изменения их величины.*

Для использования этого метода необходимо соблюдение следующих условий:

1. Поле допуска замыкающего звена должно быть равно арифметической сумме всех допусков составляющих звеньев

$$TA_{\Delta} = \sum_{m=1}^M TA_m .$$

2. Координата середины поля допуска замыкающего звена должна быть равна алгебраической сумме координат середин полей допусков составляющих звеньев

$$\Delta_{A_{\Delta}} = \sum_{n=1}^N \vec{\Delta}_{A_n} - \sum_{m=1}^M \vec{\Delta}_{A_m} ,$$

где  $\sum_{n=1}^N \vec{\Delta}_{A_n}$  – сумма координат середин полей допусков увеличивающих составляющих звеньев размерной цепи;

$\sum_{m=1}^M \vec{\Delta}_{A_m}$  – сумма координат середин полей допусков уменьшающих составляющих звеньев размерной цепи.

Это условие связано с необходимостью обеспечения требуемой посадки в сопряжении, помимо заданной величины допуска замыкающего звена (условие 1). Посадки при сборке машин обеспечиваются соответствующим расположением полей допусков деталей относительно их номинальных размеров. При определении полей допусков в соответствии с ГОСТ 25346–89 используются понятия верхнего ( $ES, es$ ) и нижнего ( $EI, ei$ ) отклонения размера. В целях упрощения последующих расчетов удобнее преобразовать эти две величины в одну – координату середины поля допуска (рис. 4.14).

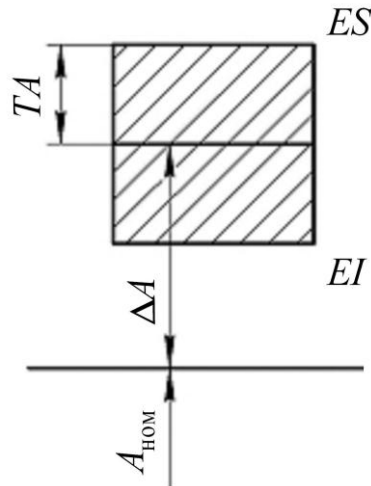


Рис. 4.14. Координата середины поля допуска

$$\Delta_A = \frac{ES + EI}{2}.$$

Величины  $TA_\Delta$  и  $\Delta_{A_\Delta}$  устанавливаются исходя из служебного назначения изделия. После этого допуски на составляющие звенья  $TA_m$  размерных цепей и их координаты середин полей допусков  $\Delta_{A_m}$  устанавливают подбором так, чтобы выполнялись эти два условия.

Схема достижения точности замыкающего звена двухзвенной размерной цепи методом полной взаимозаменяемости представлена на рис. 4.15.

В качестве примера рассмотрена следующая задача (рис. 4.16) [1]. Требуется обеспечить зазор  $\dot{A}_\Delta$  между торцами зубчатого колеса и кольца механизма, при этом служебным назначением задано, что наименьший зазор должен быть равен нулю, а наибольший 0,2 мм.

Следовательно, допуск на зазор  $TA_\Delta = 0,2 - 0,0 = 0,2$  мм, а координата середины поля допуска:  $\Delta_{A_\Delta} = \frac{0,2 + 0,0}{2} = +0,1$  мм.

Уравнение размерной цепи  $A_\Delta = -A_1 + A_2 - A_3$ .

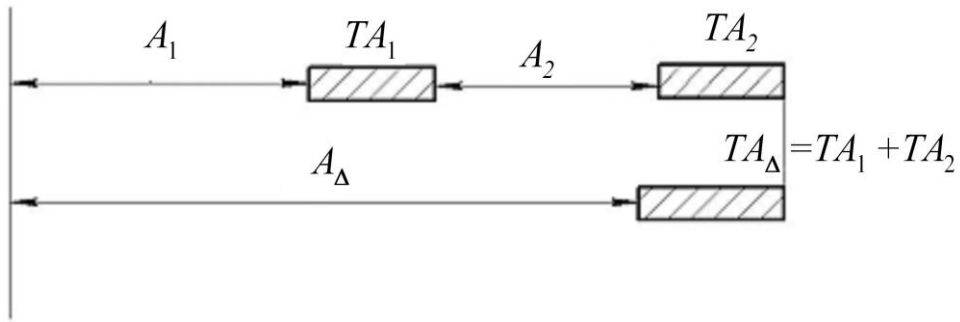


Рис. 4.15. Достижение точности замыкающего звена методом полной взаимозаменяемости

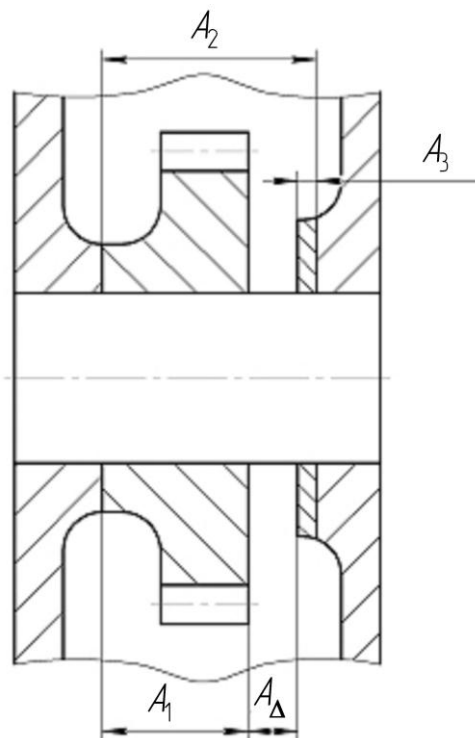


Рис. 4.16. Пример для рассмотрения методов достижения точности замыкающих звеньев размерных цепей

Для сборки узла методом полной взаимозаменяемости подбором устанавливаются следующие значения допусков:

$$TA_1 = 0,03 \text{ мм}, TA_2 = 0,15 \text{ мм}, TA_3 = 0,02 \text{ мм},$$

так, чтобы соблюдалось условие

$$TA_{\Delta} = \sum_{m=1}^M TA_m : 0,03 \text{ мм} + 0,15 \text{ мм} + 0,02 \text{ мм} = 0,2 \text{ мм}.$$

Координаты средин полей допусков составляющих звеньев принимаются таким образом, чтобы поле допуска было направ-



лено в материал детали, т.е. каждая деталь представляла бы собой «основной вал» или «основное отверстие»:

$$\Delta_{A_1} = -0,015 \text{ мм}, \Delta_{A_2} = +0,075 \text{ мм}.$$

Координата середины поля допуска третьего звена определяется из второго условия

$$\begin{aligned} \Delta_{A_\Delta} &= \sum_{n=1}^N \vec{\Delta}_{A_n} - \sum_{m=1}^M \vec{\Delta}_{A_m} = -\Delta_{A_1} + \Delta_{A_2} - \Delta_{A_3} : \\ +0,1 \text{ мм} &= -(-0,015 \text{ мм}) + 0,075 \text{ мм} - \Delta_{A_3}. \end{aligned}$$

Отсюда  $\Delta_{A_3} = -0,01 \text{ мм}$ .

Достоинствами метода полной взаимозаменяемости являются:

- наибольшая простота достижения заданной точности замыкающего звена, так как построение размерной цепи сводится к простому соединению всех составляющих ее звеньев: сборка машины этим методом превращается в простое соединение деталей;
- простота нормирования процессов достижения заданной точности во времени;
- относительная простота механизации и автоматизации технологических процессов;
- возможность использования рабочих-сборщиков низкой квалификации.

Границы применения этого метода определяются экономикой. Так, при увеличении точности замыкающего звена размерной цепи для ее обеспечения необходимо уменьшать величины допусков составляющих звеньев. То же самое произойдет, если размерная цепь содержит большое количество составляющих звеньев.

Известно, что с увеличением точности размеров деталей, себестоимость их изготовления растет (рис. 4.17).

При достижении значений допусков на размеры менее  $\dot{O}_{\text{нб}}$  бывает целесообразнее перейти на другой метод достижения точности замыкающего звена размерной цепи.

Таким образом, область использования метода полной взаимозаменяемости – размерные цепи с небольшим количеством составляющих звеньев и невысокой точностью замыкающего звена.

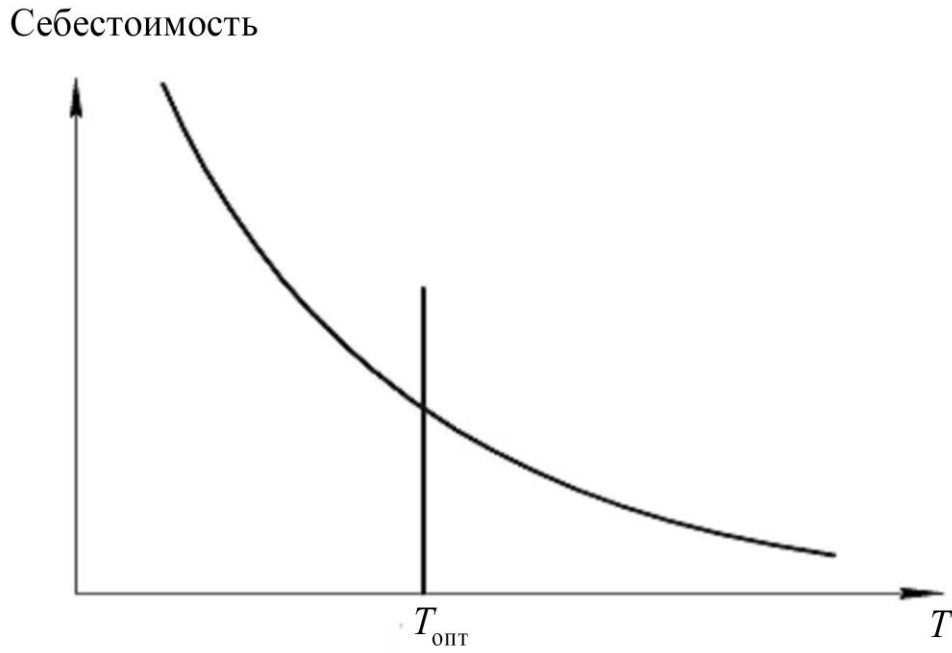


Рис. 4.17. Зависимость себестоимости детали от требуемого допуска  $T$  на ее размеры

#### 4.4.2 Метод неполной взаимозаменяемости

*Сущность метода заключается в том, что требуемая точность замыкающего звена достигается не во всех размерных цепях, а у подавляющего их большинства путем включения в размерную цепь составляющих звеньев без их выбора, подбора или изменения их величин.*

Отличие этого метода от предыдущего заключается в установлении больших по величине допусков на составляющие звенья, что делает изготовление изделий более экономичным.

При этом возникает риск получения небольшого процента брака и выход за пределы установленного допуска (рис. 4.18).

Процент брака будет небольшим, поскольку детали с крайними наибольшими и наименьшими размерами получают редко, а вероятность «встречи» таких деталей в собираемом изделии еще меньше.

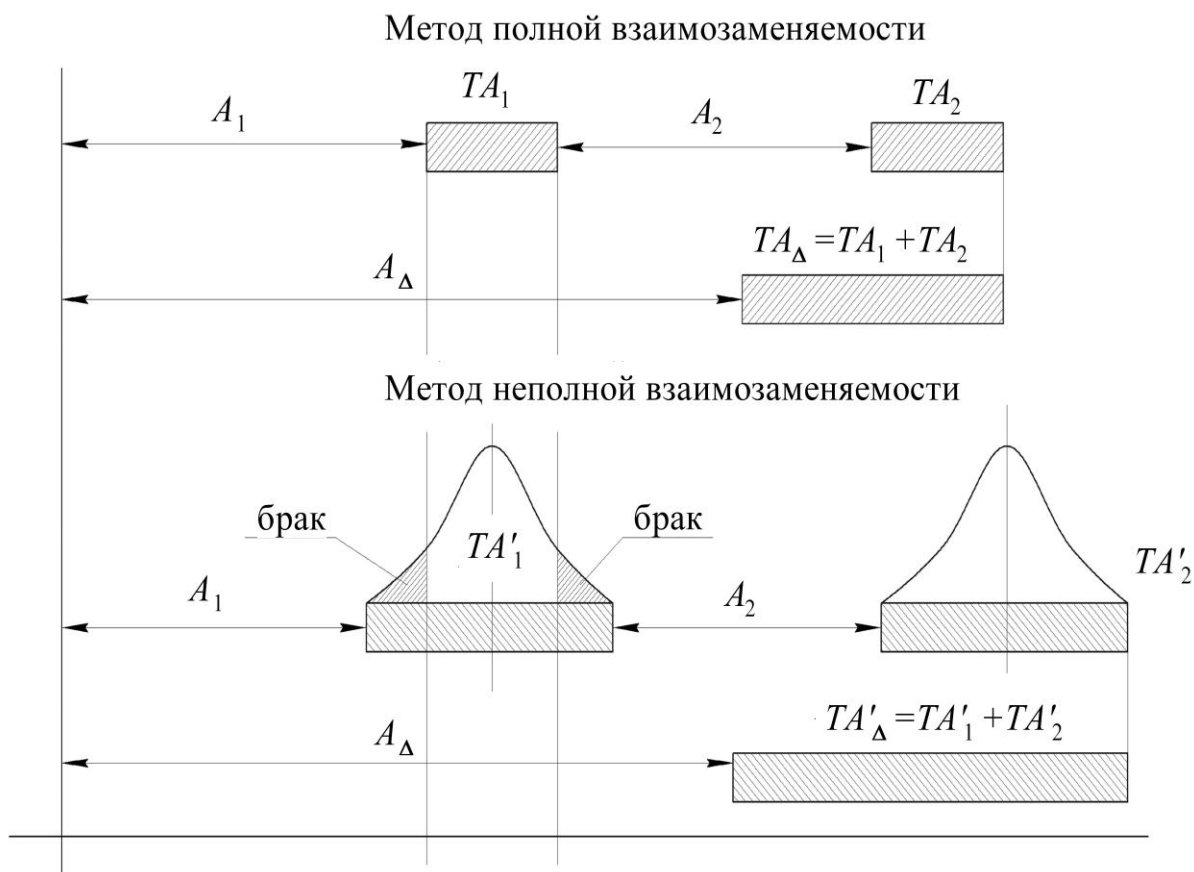


Рис. 4.18. Достижение точности замыкающего звена  
методом неполной взаимозаменяемости

Для использования этого метода необходимо соблюдение следующих условий:

1. Допуски на размеры деталей должны подчиняться следующему условию:

$$TA_{\Delta} = t \sqrt{\sum_{m=1}^M \lambda_{A_m} TA_m^2},$$

где  $TA_{\Delta}$  – допуск замыкающего звена размерной цепи;  $t$  – коэффициент риска, который определяется по таблицам в зависимости от допустимого процента брака;  $\lambda_{A_m}$  – коэффициент, зависящий от закона распределения погрешностей составляющих звеньев  $A_m$ . При нормальном законе распределения  $\lambda = \frac{1}{9}$ , при законе

распределения Симпсона  $\lambda = \frac{1}{6}$ , и при законе равной вероятности

$$\lambda = \frac{1}{3}.$$

2. Координата середины поля допуска замыкающего звена должна быть равна алгебраической сумме координат полей допусков составляющих звеньев (как при методе полной взаимозаменяемости)

$$\Delta_{A_{\Delta}} = \sum_{n=1}^N \bar{\Delta}_{A_n} - \sum_{m=1}^M \bar{\Delta}_{A_m}.$$

Реализация этого метода производится в той же последовательности, что и метода полной взаимозаменяемости. Сначала назначаются величины полей допусков составляющих звеньев с учетом первого условия, затем – координаты середин полей допусков в соответствии со вторым условием.

При сборке узла, показанного на рис. 4.16, методом неполной взаимозаменяемости сначала выбираются коэффициент риска  $t$  и коэффициенты, зависящие от законов распределения погрешностей  $\lambda_{A_m}$ . Например, если вероятность появления брака в 1% экономически оправдана, значение коэффициента риска для такой вероятности составляет  $t = 2,57$ .

Считая, что распределение погрешностей всех составляющих звеньев подчиняется закону нормального распределения, можно принять  $\lambda_{A_m} = \frac{1}{9}$ .

Подбором устанавливаются следующие величины полей допусков составляющих звеньев:

$$TA_1 = 0,1 \text{ мм}, TA_2 = 0,2 \text{ мм}, TA_3 = 0,06 \text{ мм}.$$

Выполнение первого условия производится по формуле:

$$TA_{\Delta} = t \sqrt{\sum_{m=1}^M \lambda_{A_m}^2 TA_m^2} = 2,57 \sqrt{\frac{1}{9} (0,1^2 + 0,2^2 + 0,06^2)} = 0,2 \text{ мм}.$$

Устанавливаются следующие координаты середин полей допусков:

$$\Delta_{A_1} = 0, \Delta_{A_2} = 0,1 \text{ мм}$$

Значение  $\Delta_{A_3}$  находится из уравнения (второе условие реализации):

$$\Delta_{A_\Delta} = -\Delta_{A_1} + \Delta_{A_2} - \Delta_{A_3} : 0,1 \text{ мм} = 0 + 0,1 \text{ мм} - \Delta_{A_3} ; \Delta_{A_3} = 0.$$

Основные достоинства этого метода те же, что и у метода полной взаимозаменяемости. Кроме того, этот метод значительно экономичнее по следующим причинам:

– допуски на размеры деталей шире, чем при методе полной взаимозаменяемости;

– затраты на исправление брака значительно меньше, чем на изготовление более точных деталей.

Однако допуски на размеры деталей по сравнению с методом полной взаимозаменяемости расширяются незначительно, поэтому данный метод также применим только для размерных цепей с небольшим количеством составляющих звеньев и невысокой точностью замыкающего звена.

#### 4.4.3 Метод групповой взаимозаменяемости

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

При сборке машин этим методом определяют средний допуск составляющего звена размерной цепи по формуле

$$T_{\text{ср}} = \frac{TA_{\Delta}}{m},$$

где  $TA_{\Delta}$  – допуск замыкающего звена размерной цепи;  $m$  – количество составляющих звеньев.

Это значение увеличивается в целое число раз  $n$ , и получается так называемый производственный допуск

$$T_{\text{ср}}' = nT_{\text{ср}}.$$

Исходя из величины  $T_{\text{ср}}'$  методом полной взаимозаменяемости устанавливаются допуски на составляющие звенья размерной цепи. После обработки размеры всех деталей проверяются точным измерительным инструментом, и годные детали внутри каждого типоразмера сортируют на  $n$  групп.

Собирая изделия из деталей, принадлежащих к соответствующим группам, получают требуемую точность замыкающего звена размерной цепи всех изделий (рис. 4.19).

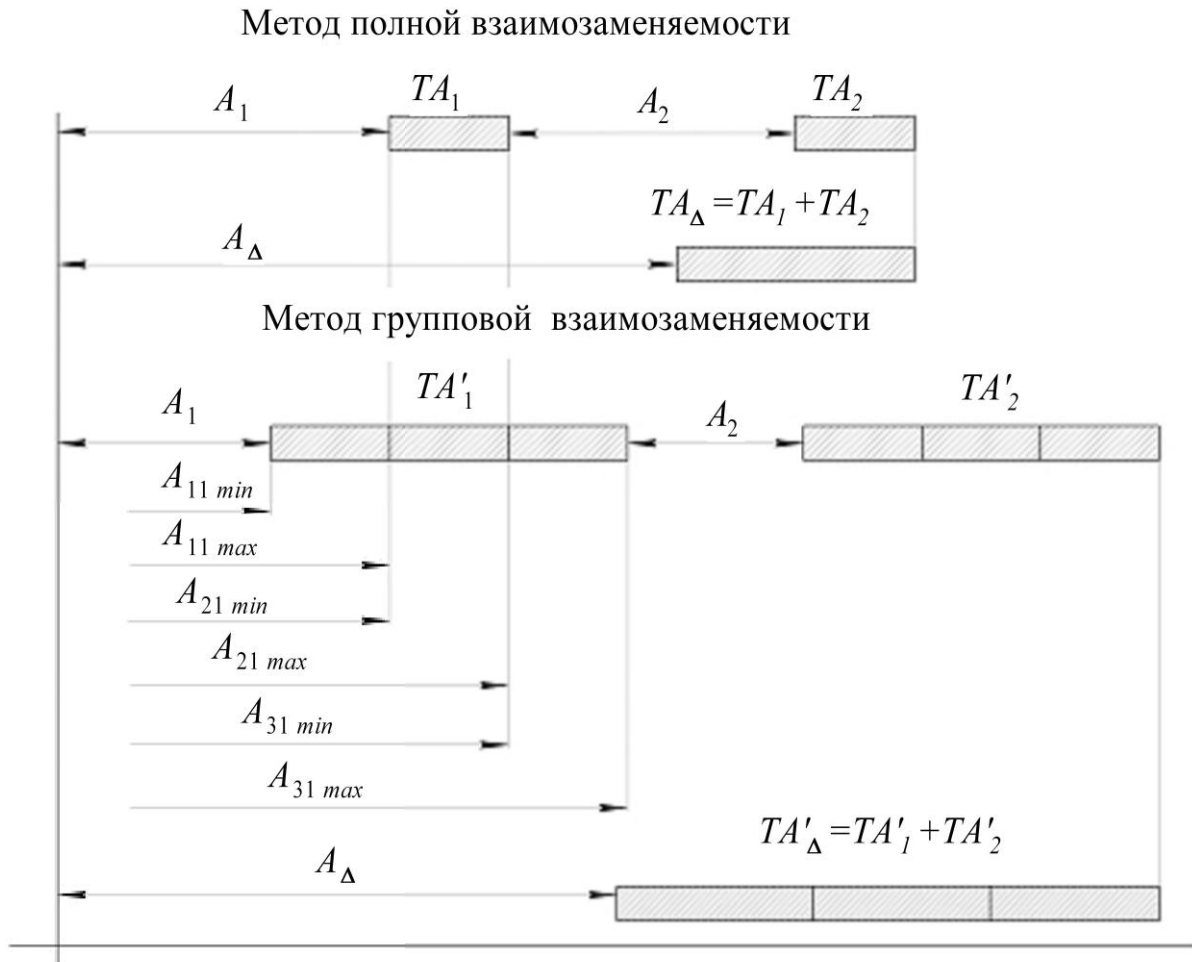


Рис. 4.19. Достижение точности замыкающего звена методом групповой взаимозаменяемости

Для реализации этого метода должны быть соблюдены следующие условия.

1. Сумма допусков всех увеличивающих составляющих звеньев должна быть равна сумме допусков всех уменьшающих составляющих звеньев размерной цепи

$$\sum_{n=1}^N T\bar{A}_n = \sum_{m=1}^M T\bar{A}_m.$$

2. Координаты середин полей допусков составляющих звеньев должны рассчитываться в соответствии с формулами

$$\Delta_{A_{\Delta}} = \sum_{n=1}^N \bar{\Delta}_{A_n} - \sum_{m=1}^M \bar{\Delta}_{A_m}; \Delta_{A_k} = \Delta_{A_{k-1}} + (k-1)TA,$$

где  $k$  – номер группы,  $TA$  – допуск на соответствующее составляющее звено.

3. Производственный допуск замыкающего звена  $TA_{\Delta}$  должен быть равен сумме производственных допусков составляющих звеньев  $TA_m$  размерной цепи

$$TA'_{\Delta} = \sum_{m=1}^M TA'_{\Delta}.$$

Предполагается, что в рассматриваемом примере (см. рис. 4.16) экономически оправдано расширение допуска замыкающего звена  $TA_{\Delta}$  в 3 раза, т.е.  $n = 3$ .

Таким образом,

$$TA'_{\Delta} = TA_{\Delta} \cdot 3 = 0,2 \cdot 3 = 0,6 \text{ мм.}$$

При расчете величин допусков составляющих звеньев должно быть соблюдено первое и третье условия, т.е.

$$TA'_2 = TA'_1 + TA'_3 = \frac{1}{2} TA'_{\Delta}$$

$$\text{Отсюда } TA'_2 = \frac{1}{2} TA'_{\Delta} = 0,3 \text{ мм, } TA'_1 + TA'_3 = \frac{1}{2} TA'_{\Delta} = 0,3 \text{ мм.}$$

Исходя из степени сложности изготовления деталей, назначим  $TA'_1 = 0,24$  мм,  $TA'_3 = 0,06$  мм.

Теперь назначаются величины полей допусков и координаты их середин для составляющих звеньев каждой группы (табл. 4.2).

Таблица 4.2

Параметры размерной цепи

№ группы	$TA_1$	$\Delta_{A_1}$	$TA_2$	$\Delta_{A_2}$	$TA_3$	$\Delta_{A_3}$
1	0,08	-0,04	-0,10	+0,05	0,02	+0,01
2	0,08	+0,04	0,10	+0,15	0,02	+0,01
3	0,08	+0,12	0,10	+0,25	0,02	+0,01

При назначении координат середин полей допусков внутри каждой группы должно выполняться условие

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

поскольку координата середины поля допуска замыкающего звена должна соответствовать требованию

$$\Delta_{A_{\Delta}} = \sum_{n=1}^N \bar{\Delta}_{A_n} - \sum_{m=1}^M \bar{\Delta}_{A_m}.$$

Очевидно, что в каждой группе получается заданная точность замыкающего звена размерной цепи.

Для того чтобы этот метод стал экономичным, необходимо соблюдение следующих условий:

1. Кривые рассеивания погрешностей всех деталей должны быть идентичны, иначе в каждую группу будет попадать различное число деталей разных типоразмеров (рис. 4.20). В противном случае количество деталей, входящих в различные группы, не совпадет и лишние детали будут отбракованы.

2. Необходимо стремиться к меньшему числу групп, поскольку увеличение количества групп ведет к усложнению организации производства.

Поэтому область применения метода – размерные цепи высокой точности с небольшим количеством составляющих звеньев в крупносерийном и массовом производстве. Этим методом во всем мире собираются сопряжения «поршень – цилиндр» двигателей внутреннего сгорания.

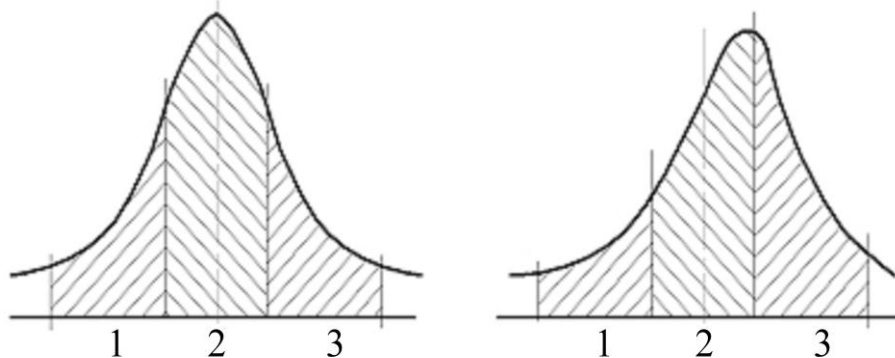


Рис. 4.20. Кривые рассеивания погрешностей деталей

#### 4.4.4 Метод пригонки

Сущность метода пригонки заключается в том, что требуемая точность замыкающего звена достигается в результате



изменения величины одного из заранее намеченных составляющих звеньев путем снятия с него необходимого слоя материала.

При использовании этого метода на все составляющие звенья размерной цепи устанавливаются экономически достижимые производственные допуски  $TA'_m$ .

В соответствии с этим допуск замыкающего звена также увеличится

$$TA'_\Delta = \sum_{m=1}^M TA'_m.$$

Для достижения требуемой точности замыкающего звена, имеющего допуск  $TA_\Delta$ , необходимо удалить из размерной цепи лишнюю величину отклонения, которая называется величиной компенсации (рис. 4.21).

Метод полной взаимозаменяемости

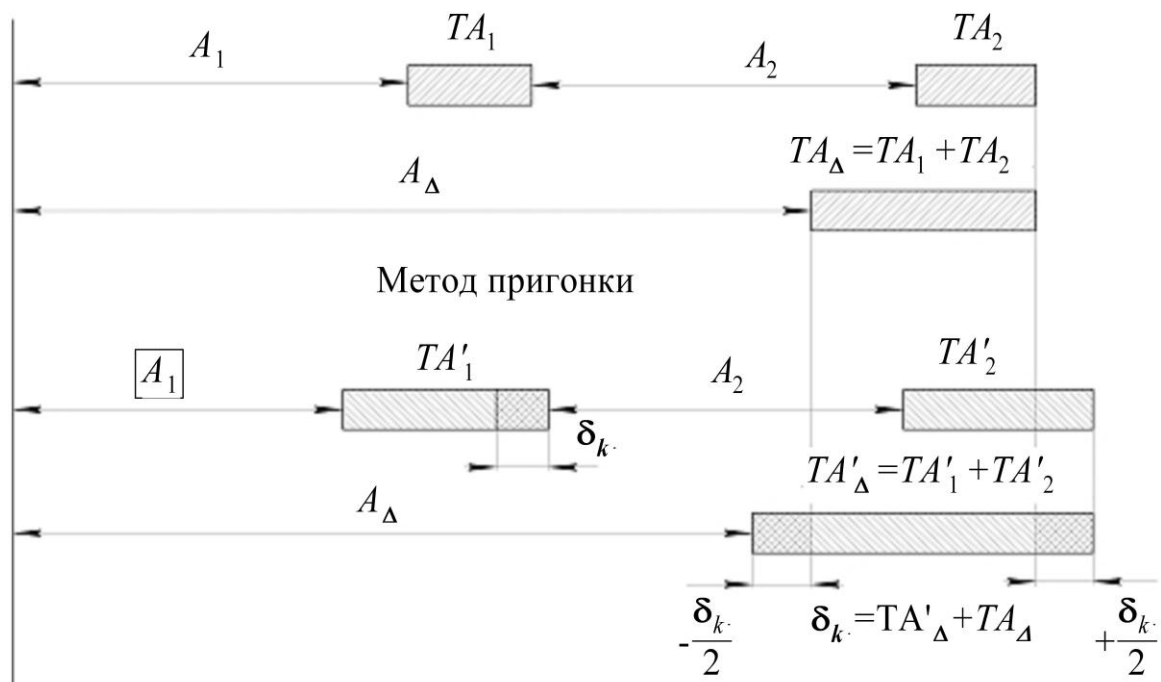


Рис. 4.21. Достижение точности замыкающего звена методом пригонки

Наибольшая возможная величина компенсации определяется по формуле

$$\delta_k = TA'_\Delta - TA_\Delta.$$

Удаление излишнего отклонения из размерной цепи осуществляется за счет изменения величины заранее выбранного со-

ставляющего звена, которое называется компенсирующим. Изменение размера компенсирующего звена производится путем снятия с него слоя материала, как правило, шабрением.

К компенсирующему звену предъявляются следующие основные требования:

- простота изменения размера компенсирующего звена;
- это звено не должно одновременно принадлежать нескольким параллельно связанным размерным цепям.

Для осуществления метода пригонки необходимо выполнение следующих условий.

1. Назначить экономичные величины полей допусков и координаты середин полей допусков на все составляющие звенья.

2. Расположить середину поля допуска выбранного компенсирующего звена относительно его номинала так, чтобы обеспечить на этом звене минимально необходимый припуск, достаточный для компенсации максимально возможной погрешности (чтобы не «надставлять» компенсирующее звено на величину  $-\frac{\delta_k}{2}$ ).

Для соблюдения этого условия при расчетах необходимо вносить дополнительную поправку к значению координаты середины поля допуска компенсирующего звена

$$\Delta_k = \frac{\delta_k}{2} + \Delta'_{A_\Delta} - \Delta_{A_\Delta},$$

где  $\delta_k$  – величина компенсации;

$$\Delta'_{A_\Delta} = \sum_{n=1}^N \bar{\Delta}'_{A_n} - \sum_{m=1}^M \bar{\Delta}'_{A_m},$$

где  $\bar{\Delta}'_{A_n}$  – координаты середины полей расширенных допусков увеличивающих составляющих звеньев размерной цепи;  $\bar{\Delta}'_{A_m}$  – координаты середин полей расширенных допусков уменьшающих составляющих звеньев размерной цепи;  $\Delta_{A_\Delta}$  – координата середины поля допуска замыкающего звена.

В случае симметричного расположения допусков, т.е. когда все  $\Delta_{A_m} = 0$ , равенство принимает вид

$$\Delta_k = \frac{\delta_k}{2}.$$

В рассматриваемом примере (рис. 4.16)

$$TA_{\Delta} = 0,2 \text{ мм}, \Delta_{A_{\Delta}} = 0,1 \text{ мм}$$

Для достижения требуемой точности зазора методом пригонки в качестве компенсирующего звена выбирается размер  $A_3$  – ширина кольца.

Назначаются следующие допуски на составляющие звенья размерной цепи:

$$TA'_1 = 0,3 \text{ мм}, TA'_2 = 0,4 \text{ мм}, TA'_3 = 0,1 \text{ мм},$$

и координаты средин полей допусков

$$\Delta_{A_1} = -0,15 \text{ мм}, \Delta_{A_2} = +0,2 \text{ мм}, \Delta_{A_3} = +0,25 \text{ мм}.$$

Здесь также должно выполняться условие

$$\Delta_{A_{\Delta}} = \sum_{n=1}^N \bar{\Delta}_{A_n} - \sum_{m=1}^M \bar{\Delta}_{A_m} : 0,1 \text{ мм} = +0,15 \text{ мм} + 0,2 \text{ мм} - 0,25 \text{ мм}.$$

Производственный допуск замыкающего звена расширяется и будет равен

$$TA'_{\Delta} = \sum_{m=1}^M TA'_m = 0,3 + 0,4 + 0,1 = 0,8 \text{ мм}.$$

Наибольшая величина компенсации равна

$$\delta_k = TA'_{\Delta} - TA_{\Delta} = 0,8 - 0,2 = 0,6 \text{ мм}.$$

Для того чтобы создать на звене  $A_3$  необходимый для пригонки слой материала, в координату середины поля допуска этого звена необходимо внести поправку  $\Delta_k$

$$\Delta_k = \frac{\delta_k}{2} + \Delta'_{A_{\Delta}} - \Delta_{A_{\Delta}} = \frac{0,6}{2} + (0,15 + 0,2 - 0,25) - 0,1 = 0,3 \text{ мм}$$

Следовательно,

$$\Delta_{A_3} = 0,25 + \Delta_k = 0,25 + 0,3 = 0,55 \text{ мм}.$$

Таким образом, предельные отклонения размеров составляющих звеньев размерной цепи равны

$$A_{1-0,3}; A_2^{+0,4}; A_{3+0,5}^{+0,6}.$$

Главное достоинство метода пригонки – возможность получения высокой точности замыкающих звеньев многозвенных

размерных цепей при изготовлении деталей с широкими допусками.

Недостатки метода следующие:

1. Необходимость выполнения на сборке механообрабатывающих работ, связанных с пригонкой. Как правило, это ручные работы, приводящие к возникновению стружки на сборочном участке, что радикально ухудшает качество сборки. Пригоночные работы состоят из двух операций:

а) измерение погрешности, образующейся на замыкающем звене размерной цепи после сборки;

б) удаление лишнего слоя материала с компенсирующего звена.

Для выполнения этих операций нужен рабочий высокой квалификации, что делает метод дорогим.

2. Изменением состояния одного звена необходимо обеспечить достижение всех показателей точности – точности размеров, относительных поворотов, формы, что представляет значительную сложность.

3. Значительные колебания во времени, связанные с выполнением пригоночных работ, вызывают сложность нормирования этих работ.

В этой связи метод пригонки применяется в мелкосерийном, единичном и ремонтном производстве либо там, где другие методы не обеспечивают заданной точности, например при сборке высокоточных металлорежущих станков.

#### 4.4.5 Метод регулирования

*Сущность метода регулирования заключается в том, что требуемая точность замыкающего звена достигается путем изменения величины заранее выбранного компенсирующего звена без снятия с него слоя материала.*

Метод аналогичен методу пригонки (см. рис. 4.21), но используется способ изменения величины компенсирующего звена без снятия с него слоя материала.

Это изменение осуществляется двумя путями:

1. Изменением положения одной детали, путем ее перемещения.

2. Введением в размерную цепь специальной детали требуемого размера.

Детали, изменением положения которых достигается требуемая точность замыкающего звена, называются подвижными компенсаторами.

В ряде случаев в роли компенсаторов выступают целые устройства.

Специальные детали требуемых размеров, вводимые для той же цели в размерные цепи, называются неподвижными компенсаторами.

При использовании этого метода, так же как и при методе пригонки, на составляющие звенья размерной цепи назначаются экономически достижимые производственные допуски  $TA'_m$ .

Допуск на замыкающем звене расширяется и будет иметь величину

$$TA'_\Delta = \sum_{m=1}^M TA'_m.$$

Затем определяется величина компенсации  $\delta_k$  по формуле

$$\delta_k = TA'_\Delta - TA_\Delta.$$

Если используется подвижный компенсатор, он должен иметь возможность изменять размер в пределах  $\delta_k$ .

В случае с неподвижным компенсатором определяется число ступеней компенсации

$$N = \frac{TA'_\Delta}{TA_\Delta - TA_{\text{комп}}},$$

где  $TA_{\text{комп}}$  – допуск на размер компенсатора. Если число ступеней компенсации получилось дробным, его округляют до большего значения.

Разность  $TA_\Delta - TA_{\text{комп}}$  представляет собой ступень компенсации, на величину которой различаются размеры деталей – неподвижных компенсаторов (рис. 4.22).

Затем рассчитываются размеры компенсаторов.

В примере (см. рис. 4.16) необходимо обеспечить

$$TA_\Delta = 0,2 \text{ мм}; \Delta_{A_\Delta} = 0,1 \text{ мм}.$$

В качестве неподвижного компенсатора выбирается звено  $A_3$ .

Устанавливаются следующие производственные допуски на величины составляющих звеньев:

$$TA'_1 = 0,2 \text{ мм}; TA'_2 = 0,4 \text{ мм}; TA'_3 = 0,05 \text{ мм}.$$

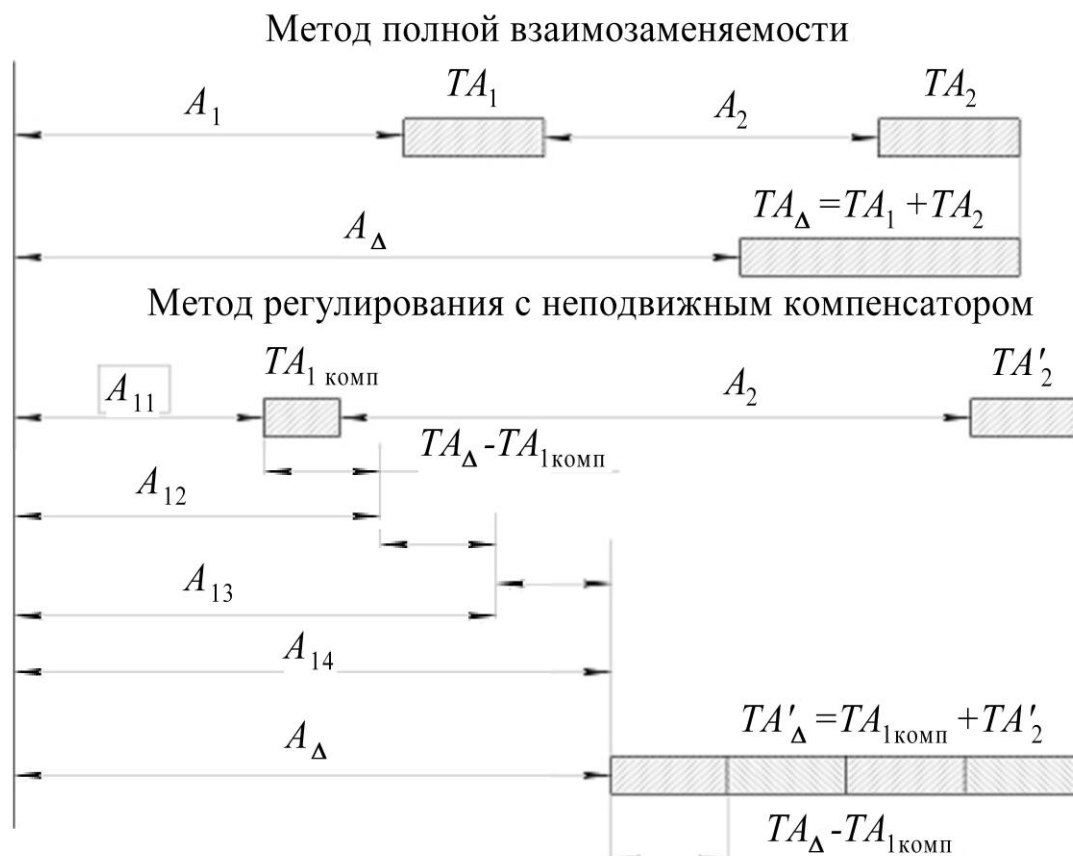


Рис. 4.22. Достижение точности замыкающего звена методом регулирования

В размерной цепи необходимо компенсировать только отклонения звеньев  $A_1$  и  $A_2$  с помощью звена  $A_3$ , но без учета его допуска.

Производственный допуск замыкающего звена

$$TA'_\Delta = \sum_{m=1}^M TA'_m = TA'_1 + TA'_2 = 0,2 + 0,4 = 0,6 \text{ мм}.$$

Наибольшая величина компенсации

$$\delta_k = TA'_\Delta - TA_\Delta = 0,6 - 0,2 = 0,4 \text{ мм}.$$

Число ступеней компенсации

$$N = \frac{TA'_\Delta}{TA_\Delta - TA'_{\text{КОМП}}} = \frac{0,6}{0,2 - 0,05} = 4.$$

Величина каждой ступени компенсации равна

$$TA_{\Delta} - TA'_{\text{КОМП}} = 0,2 - 0,05 = 0,15 \text{ мм}.$$

При числе компенсаторов  $N = 4$  поле производственного допуска  $TA'_{\Delta}$  будет разбито на 4 зоны (см. рис. 4.22). Отклонения, возникающие в пределах той или иной зоны, должны компенсироваться путем постановки в изделие компенсатора из соответствующей группы.

Размер компенсатора первой ступени равен его номинальному размеру. Размеры компенсаторов каждой следующей ступени будут отличаться от размеров компенсаторов предшествующей ступени на величину ступени компенсации.

С учетом допуска на изготовление компенсаторов их размеры будут составлять:

- 1-я ступень  $(A_3)_{-0,05}$  мм;
- 2-я ступень  $(A_3 + 0,15)_{-0,05}$  мм;
- 3-я ступень  $(A_3 + 0,30)_{-0,05}$  мм;
- 4-я ступень  $(A_3 + 0,45)_{-0,05}$  мм.

При задании размеров компенсаторов разницу в номиналах целесообразно перенести на координаты середин полей их допусков. Тогда отклонения размера  $A_3$  должны быть равны

- $A_{3-0,05}$  мм – для 1-й ступени,
- $A_{3+0,10}^{+0,15}$  мм – для 2-й ступени,
- $A_{3+0,25}^{+0,30}$  мм – для 3-й ступени,
- $A_{3+0,40}^{+0,45}$  мм – для 4-й ступени.

Если координаты середин полей допусков составляющих звеньев  $A_1$  и  $A_2$  установлены произвольно, то при определении размера компенсаторов первой ступени необходимо внести поправку в координату середины поля допуска компенсирующего звена

$$\Delta'_k = \frac{\delta_k}{2} - \Delta'_{A_{\Delta}},$$

где  $\Delta'_{A_\Delta} = \sum_{n=1}^N \bar{\Delta}'_{A_n} - \sum_{m=1}^M \bar{\Delta}'_{A_m}$ , причем значения  $\Delta'_{A_n}$  и  $\Delta'_{A_m}$  установлены произвольно.

Если компенсатор – увеличивающее звено, поправку  $\Delta'_k$  вносят со своим знаком, а если уменьшающее – с противоположным знаком.

Основные достоинства этого метода следующие:

- возможность достижения высокой точности замыкающего звена при экономичных допусках на все составляющие звенья;
- отсутствие пригоночных работ или работ, связанных с подбором деталей, облегчает нормирование технологического процесса сборки;
- возможность периодически подстраивать, или непрерывно автоматически сохранять требуемую точность замыкающего звена.

Недостаток метода – увеличение в некоторых случаях количества деталей в машине.

Этот метод используется для многозвенных размерных цепей высокой точности и считается самым технологичным.

#### 4.5 Основы теории базирования

При изготовлении машин возникают задачи соединения с заданной точностью двух или более деталей. Для решения этих задач служит теория базирования.

При рассмотрении основ теории базирования делается предположение, что все детали представляют собой абсолютно твердые тела. В реальности соединяемые детали первоначально контактируют в точках (рис. 4.23, *а*). В начальный момент давление в этих точках превышает пределы текучести материалов, что приводит к пластической деформации, которая называется контактной. Точки контакта превращаются в площадки контакта (рис. 4.23, *б*), площадь которых увеличивается до тех пор, пока давление на них не станет меньше предела текучести материалов деталей. В результате контактных деформаций первоначально достигнутое положение сопряженных деталей изменяется. Так как все детали абсолютно твердые тела, предполагается, что контактных деформаций не происходит, и сопряженные детали сохраняют первоначально достигнутое положение.



В соответствии с ГОСТ 21495–76 «Базирование и базы в машиностроении» *базирование* – это придание заготовке или изделию требуемого положения относительно выбранной системы координат.

Для определения положения деталей используется прямоугольная система координат.

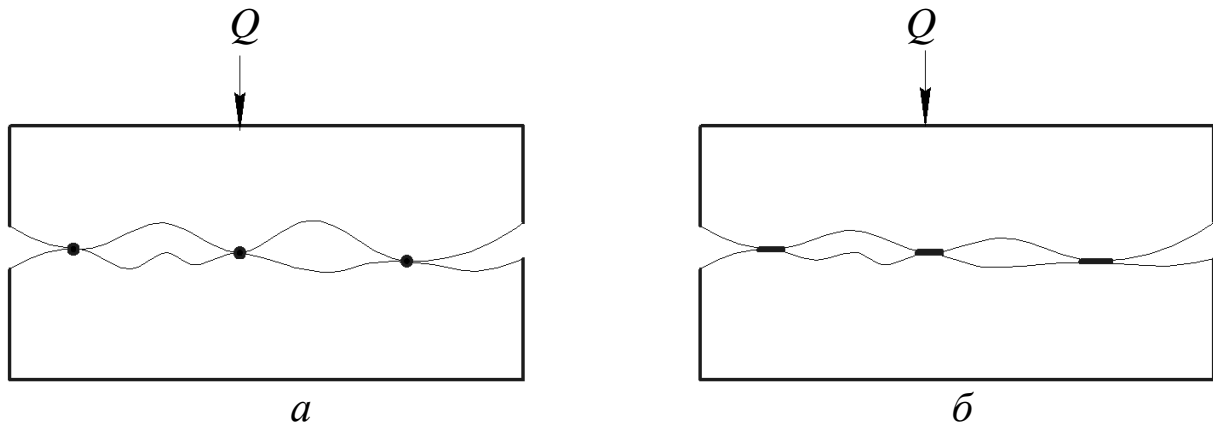


Рис. 4.23. Контактные деформации деталей

Число независимых перемещений, которые может иметь тело в заданной системе координат, называется числом степеней свободы. Абсолютно твердое тело в пространстве имеет шесть степеней свободы.

В прямоугольной системе координат это три перемещения вдоль осей  $x$ ,  $y$ ,  $z$  и три вращения вокруг этих осей (рис. 4.24).

Таким образом, чтобы однозначно определить положение призматической детали в выбранной системе координат, необходимо лишить его шести степеней свободы. Для этого необходимо установить шесть геометрических связей между системой координат детали  $x$ ,  $y$ ,  $z$  и выбранной системой координат  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ .

Геометрическими связями называются условия, которые налагают ограничение на положение точек тела в пространстве.

Связи осуществляются через вспомогательные тела – установочные и зажимные элементы приспособлений.

Эффект действия связи называется реакцией связи.

В рассматриваемом примере (см. рис. 4.24) геометрические связи показаны линиями с точками на концах. Одна из точек принадлежит системе координат детали  $x$ ,  $y$ ,  $z$ , другая – выбран-

ной системе координат  $X, Y, Z$ . Линия символизирует постоянство расстояния между этими двумя точками. При этом каждая геометрическая связь лишает тело какой-то одной степени свободы.

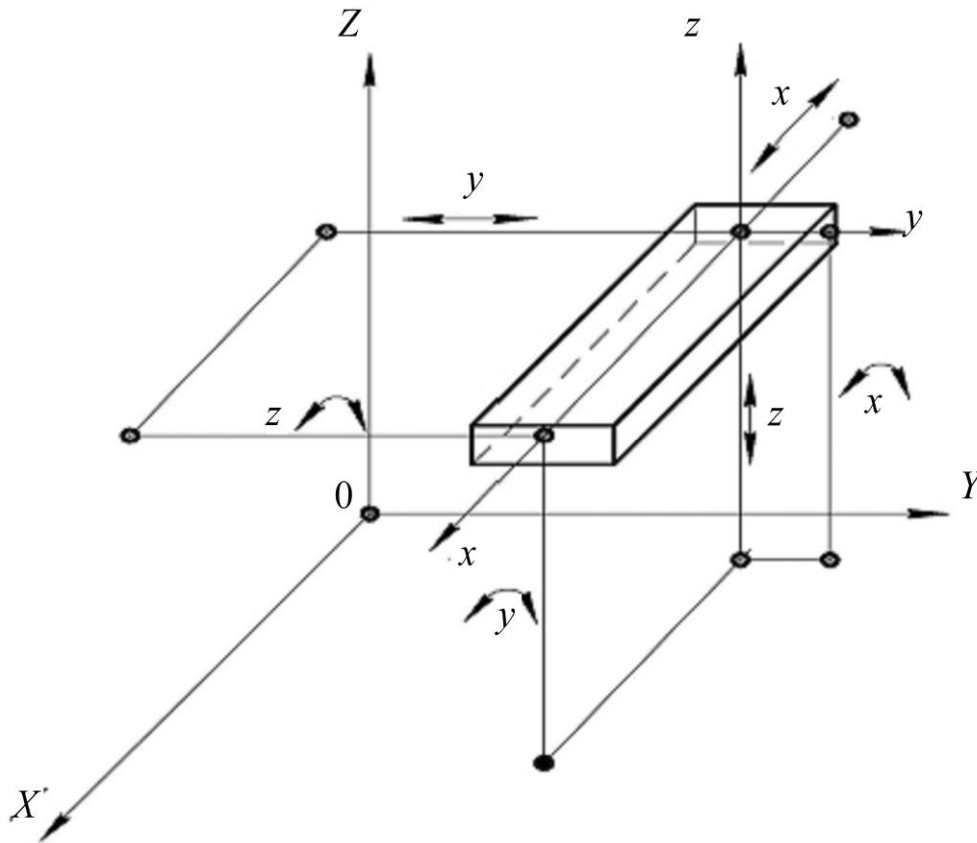


Рис. 4.24. Базирование призматической детали

Так, установка связи между началом системы координат детали  $x, y, z$  и плоскостью  $XOY$  (связь  $\updownarrow z$ , см. рис. 4.24) лишает деталь перемещения вдоль оси  $z$ , так как попытка перемещения вдоль этой оси приведет к изменению расстояния между точками, принадлежащими системе координат детали и выбранной системы координат. Вместе с тем, деталь может перемещаться вдоль осей  $x$  и  $y$ , и вращаться вокруг всех трех осей, не нарушая этого расстояния.

Аналогично установкой связей  $\updownarrow x$  и  $\updownarrow y$  деталь лишается перемещений вдоль осей  $x$  и  $y$ .

Лишить деталь вращения, например, вокруг оси  $x$  возможно, установив геометрическую связь между какой-то точкой, лежа-

щей на оси  $y$  детали с плоскостью  $XOY$  выбранной системы координат. Аналогично установка геометрической связи между произвольной точкой, лежащей на оси  $x$  детали, с плоскостью  $XOY$  выбранной системы координат лишает деталь вращения вокруг оси  $y$ .

Деталь лишается последней степени свободы – вращения вокруг оси  $z$  установлением геометрической связи между какой-то точкой на оси  $x$  и плоскостью выбранной системы координат  $XOZ$ .

Базирование детали цилиндрической формы выглядит следующим образом (рис. 4.25). Аналогично предыдущему варианту (см. рис. 4.24) деталь лишается трех степеней свободы – трех перемещений, наложением геометрических связей на положение центра системы координат детали.

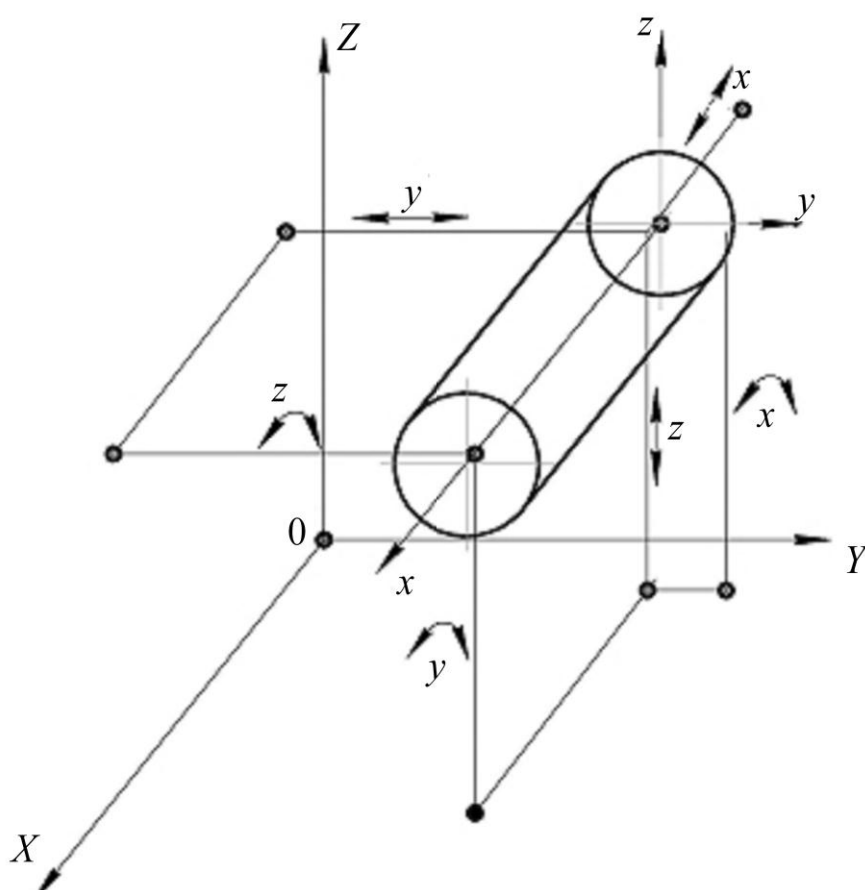


Рис. 4.25. Базирование цилиндрической детали

По аналогии, деталь лишается вращений вокруг осей  $y$  и  $z$  наложением геометрических связей на положение точек, принад-

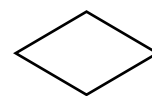
лежащих оси  $x$  относительно плоскостей  $XOY$  и  $XOZ$  выбранной системы координат (см. рис. 4.25).

Вращение вокруг оси  $x$  цилиндрической детали исключается наложением геометрической связи, например, между точкой пересечения оси  $y$  системы координат детали с цилиндрической поверхностью детали и точкой, расположенной в плоскости  $XOY$  выбранной системы координат.

Предложенные схемы наложения связей неудобны для определения положения реальных деталей, поскольку реальные детали в машиностроении имеют сложные формы, поэтому связи, создающиеся при базировании, изображаются их символами – *опорными точками* (рис. 4.26).



Вид спереди  
и сбоку



Вид сверху

Рис. 4.26. Опорная точка – символ геометрической связи

Стрелка указывает направление действия геометрической связи, а также на поверхность или ось, служащую *базой*. В соответствии с ГОСТ 21495–76 *база* – это поверхность или выполняющее ту же функцию сочетание поверхностей, ось, точка, принадлежащая заготовке или изделию и используемая для базирования.

С использованием *опорных точек* в качестве *символов геометрических связей*, базирование призматической детали, показанное на рис. 4.24, можно представить в виде следующей схемы (см. рис. 4.27). При этом опорные точки указывают на поверхности призматической детали, служащие базами там, где геометрические связи «протыкают» поверхности детали. Это означает, что для определения положения этой детали необходимы реальные поверхности, образующие систему координат детали.

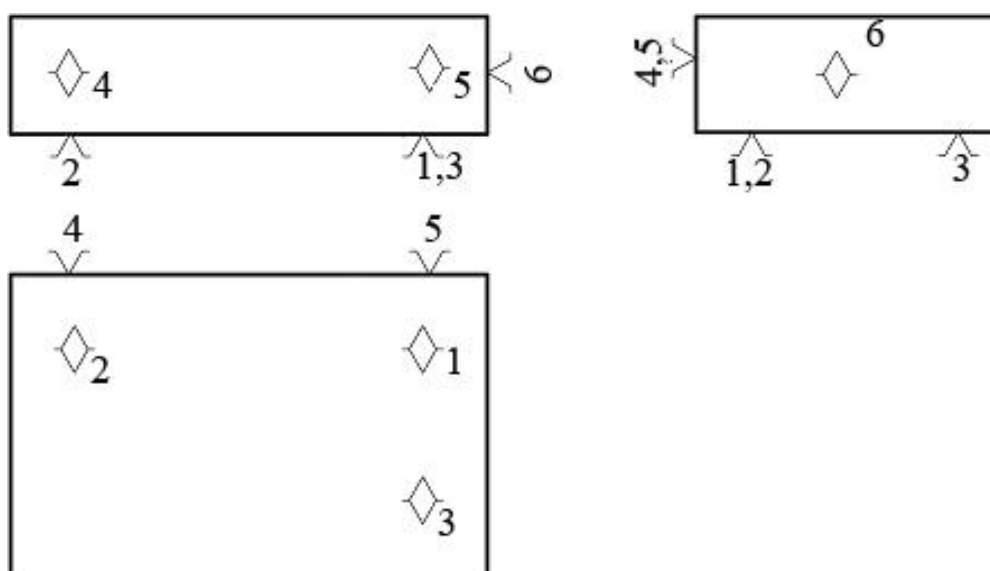


Рис. 4.27. Схема базирования призматической заготовки

По аналогии, базирование цилиндрической детали можно представить схемой, показанной на рис. 4.28.

Представленные схемы с использованием символов геометрических связей – опорных точек, называются *схемами базирования деталей*.

При рассмотрении схем базирования каждой разновидности детали выделяются три базы: при базировании призматической детали – три плоскости (см. рис. 4.27); при базировании цилиндрической детали – ось цилиндра, торцевая поверхность и наружная цилиндрическая поверхность (рис. 4.28).

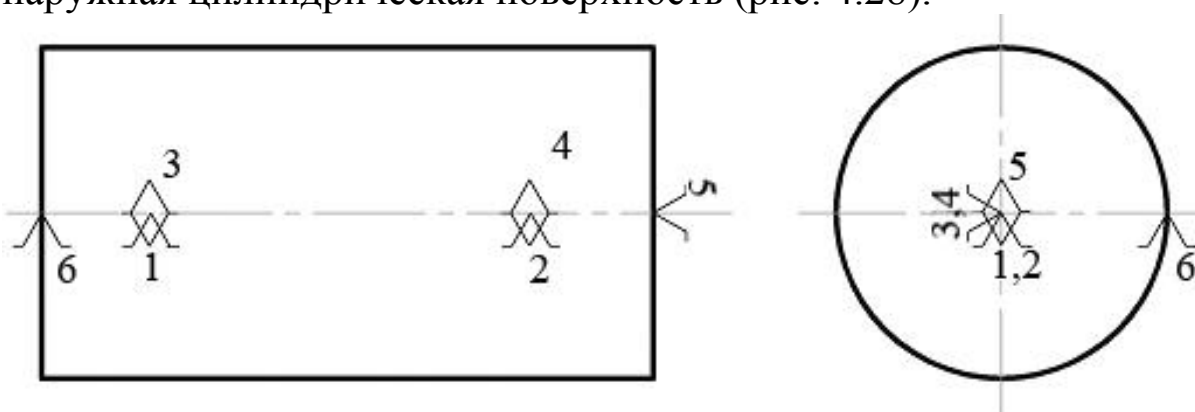


Рис. 4.28. Схема базирования цилиндрической заготовки

*Комплект баз* – это совокупность трех баз, образующих систему координат заготовки или детали.

*Правило шести точек* – для определения положения детали, рассматриваемой как абсолютно твердое тело, относительно другой детали *необходимо и достаточно* иметь шесть опорных точек, лишаящих деталь шести степеней свободы.

Следует отметить, что *силы – не базируют*. Силы прикладываются после определения положения деталей и *фиксируют достигнутое положение, но не базируют*.

#### 4.5.1 Классификация баз

Классификация баз производится по трем признакам (ГОСТ 21495–76).

##### А. По назначению

1. *Конструкторские базы* – это, используемые для определения положения деталей или сборочных единиц в изделии.

При этом *основные конструкторские базы* – это конструкторские базы, принадлежащие данной детали или сборочной единице и используемые для определения ее положения в изделии.

*Вспомогательные конструкторские базы* – это конструкторские базы, принадлежащие данной детали или сборочной единице и используемые для определения положения присоединяемых к ним деталей.

Понятие «*конструкторские базы*» возникает при проектировании изделий. При простановке размеров «стрелки» указывают на конструкторские базы.

2. *Технологические базы* – это базы, используемые для определения положения заготовки или изделия в процессе изготовления или ремонта. Эти понятия возникают при проектировании технологических процессов.

3. *Измерительные базы* – это базы, используемые для определения относительного положения контролируемой заготовки или изделия и средств измерения. Эти базы возникают при измерении.

##### Б. По лишаемым степеням свободы

*Установочная база* – это база, лишаящая заготовку или изделие трех степеней свободы – перемещения вдоль одной оси и поворотов вокруг двух других осей (опорные точки 1, 2, 3 на рис. 4.27).

*Направляющая база* – это база, лишаящая заготовку или изделие двух степеней свободы – перемещения вдоль одной оси и поворота вокруг другой (опорные точки 4, 5 на рис. 4.27).

*Опорная база* – это база, лишаящая заготовку или изделия одной степени свободы – перемещения вдоль одной оси или поворота вокруг оси (опорная точка 6 на рис. 4.27 и опорные точки 5 и 6 на рис. 4.28).

*Двойная направляющая база* – это база, лишаящая заготовку или изделие четырех степеней свободы – перемещения вдоль двух осей и поворотов вокруг этих осей (опорные точки 1, 2, 3, 4 на оси цилиндра, рис. 4.28).

*Двойная опорная база* – это база, лишаящая заготовку или изделие двух степеней свободы – перемещений вдоль двух координатных осей.

В. По характеру проявления

*Скрытая база* – это база заготовки или изделия в виде воображаемой плоскости, оси или точки (ось детали, плоскость симметрии).

*Явная база* – это база заготовки или изделия в виде реальной поверхности, сочетания реальных поверхностей, разметочной риски или пересечения рисок.

#### 4.5.2 Определенность и неопределенность базирования.

Под *определенностью базирования* детали понимается неизменность ее положения относительно сопряженных деталей, определяющих ее положение при работе в машине, в процессе обработки или измерения.

Определенность базирования характеризуется непрерывностью контакта между поверхностями деталей.

Чтобы обеспечить эту непрерывность, к деталям прикладывают силы закрепления – силы, прижимающие одни детали к другим, т.е. создается *силовое замыкание*.

При создании силового замыкания необходимо соблюдение двух требований:

1. Величина сил, создающих силовое замыкание, должна быть больше сил, стремящихся нарушить контакт деталей.

2. Силы, создающие силовое замыкание, должны быть приложены ранее сил, нарушающих контакт.

Без соблюдения этих условий машины не могут выполнять своего служебного назначения.

Для создания силового замыкания используются следующие виды сил:

- 1) упругие силы материала отдельных деталей;
- 2) силы трения;
- 3) силы тяжести деталей;
- 4) магнитные и электромагнитные силы;
- 5) силы сжатого воздуха, жидкости и т.п.;
- 6) сочетания перечисленных сил.

При соединении детали соприкасаются не всеми поверхностями, а некоторыми точками. В результате приложение сил закрепления вызывает контактные деформации, которые вносят добавочные погрешности.

Кроме контактных деформаций могут возникнуть и собственные деформации деталей.

Отсюда следует, что для соблюдения определенности базирования деталей необходимо придерживаться следующих условий:

1. Правильный выбор базирующих поверхностей деталей.
2. Создание правильного силового замыкания.
3. Уменьшение контактных деформаций путем расчета и выдерживания необходимых допусков на отклонения формы поверхностей.
4. Выбор точек приложения сил зажима по возможности против опорных точек для уменьшения собственных деформаций деталей.
5. Установление последовательности приложения сил зажима, не вызывающей изменения положения деталей во время их закрепления.

При обработке нежестких деталей к ним подводятся дополнительные опоры. Они не базируют, так как подводятся после установки и закрепления детали и не участвуют в определении положения детали. Они служат для увеличения жесткости технологической системы.

*Неопределенность базирования* – это однократное или многократное изменение положения детали относительно сопряженных деталей и узлов.



Существует две основные причины неопределенности базирования.

1. Силовое замыкание приводит к контактным деформациям деталей, в результате чего первоначальное положение деталей изменяется (см. рис. 4.23).

2. Для выполнения машиной своего служебного назначения некоторым ее деталям и узлам оставляются определенные степени свободы. Например, для того, чтобы шпиндель токарного станка мог вращаться, его монтируют в подшипниках. Любой подшипник имеет радиальный и торцевой зазор, иначе он не сможет выполнять свое служебное назначение. В результате шпиндель станка, кроме разрешенной степени свободы – вращения вокруг своей оси, получит еще две степени свободы – радиальное и торцевое биение в пределах зазоров подшипников.

Следовательно, неопределенность базирования ведет к возникновению дополнительных погрешностей.

#### 4.5.3 Смена баз

*Смена баз* – это замена одних поверхностей детали, выбранных для базирования, другим и поверхностями [1]. Различают неорганизованную и организованную смену баз.

*Неорганизованная смена баз* – это смена, происходящая без соблюдения каких-либо условий, например из-за погрешностей геометрических форм заготовок (рис. 4.29). Заготовка весом  $G$ , закрепляемая силой  $Q$ , базируется на нижнюю плоскость (рисунок слева). Если момент от силы  $Q$  превысит момент от силы  $G$ , заготовка «опрокинется», и вместо нижней плоскости технологической базой станет ее торцевая поверхность (рисунок справа).

Смена баз произошла случайно, без соблюдения каких-либо условий, и могла быть даже незамеченной. В результате, при обработке заготовки возникнет значительная неконтролируемая погрешность.

*Организованная смена баз* – это смена баз с соблюдением определенных условий. Пример организованной смены баз приведен на рис. 4.30.

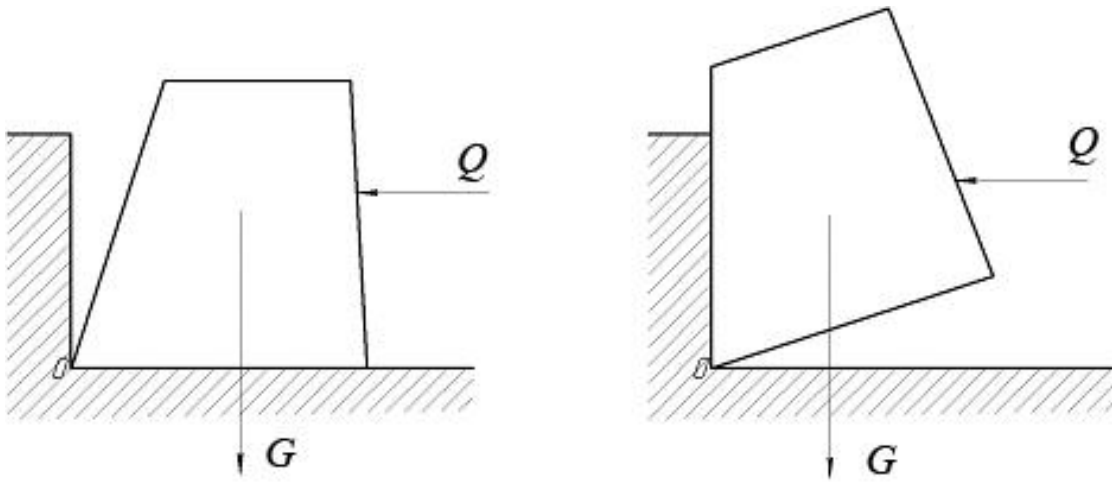


Рис. 4.29. Смена баз из-за погрешностей геометрических форм заготовок

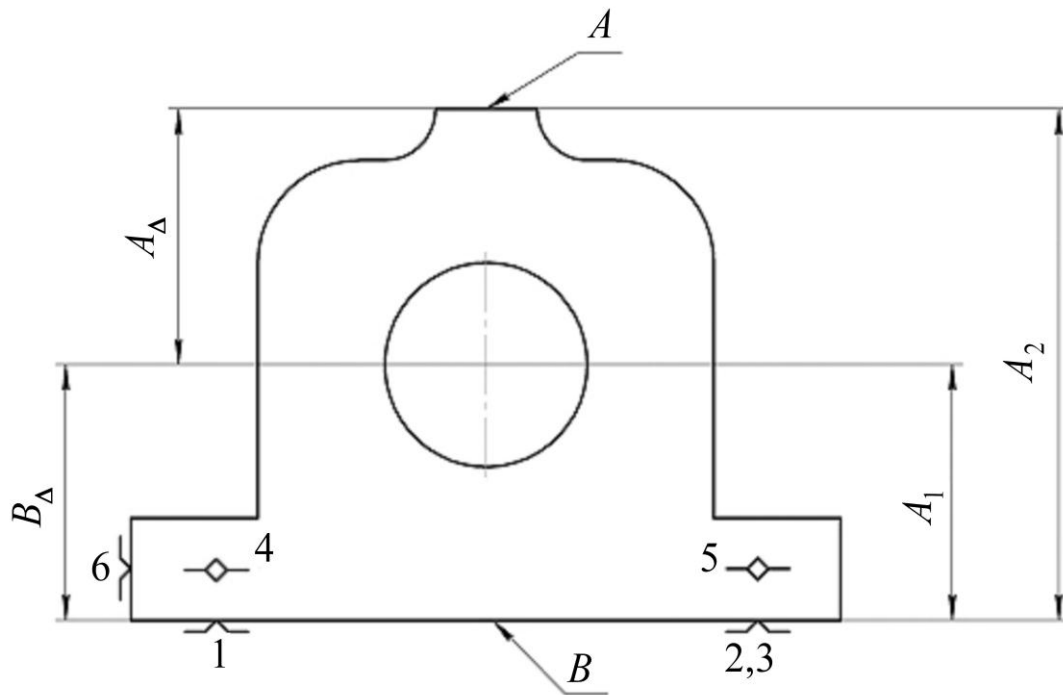


Рис. 4.30. Организованная смена баз

В качестве конструкторской базы определена поверхность  $A$ , от которой задано расстояние до оси отверстия  $A_{\Delta}$ . Конструкторская база имеет небольшие размеры и неудобна для технологического базирования, поэтому в качестве технологической базы выбирается поверхность  $B$ , имеющая значительные габаритные размеры. Поскольку любой станок настраивается относительно своих технологических баз, при растачивании отверстия настро-

ечным размером служит размер  $A_1$ . Заданный конструктором размер  $A_\Delta$  получается как замыкающее звено размерной цепи, состоящей из размеров  $A_1$  и  $A_2$ , где размер  $A_2$  принадлежит заготовке. Следовательно, погрешность размера  $A_\Delta$  получается, как сумма погрешностей размеров  $A_1$  и  $A_2$

$$\omega_{A_\Delta} = \omega_{A_1} + \omega_{A_2}.$$

Таким образом, организованная смена баз ведет к замене одного размера ( $A_\Delta$ ) двумя новыми ( $A_1$  и  $A_2$ ).

Условия организованной смены баз следующие:

1. Установить размерную связь между обрабатываемой поверхностью и поверхностью, выбранной новой базой (в примере размер  $A_1$ ).

2. Установить размерную связь между «старой» и «новой» базами (в примере размер  $A_2$ ).

3. Установить допуски на вновь получившиеся размеры, исходя из условия метода полной взаимозаменяемости

$$TA_\Delta = TA_1 + TA_2.$$

Из последнего условия очевидно, что допуски на вновь возникшие размеры будут жестче, чем допуск на первоначальный размер  $A_\Delta$ , что усложняет задачу технолога по получению детали заданного качества. Поэтому организованная смена баз должна производиться в крайних случаях:

а) когда нельзя обработать все поверхности детали (заготовки) с одной ее установки;

б) когда для получения требуемой точности или других показателей качества деталь приходится обрабатывать на различных станках;

в) когда смена баз повышает экономичность достижения требуемой точности детали;

г) при сборке машины, чтобы сделать выполнение работы более удобным и в целях сокращения затрачиваемого времени;

д) для повышения точности и упрощения измерения детали, механизма или машины с целью сокращения расходов на изготовление инструментов;

е) на первой операции механической обработки детали, когда обрабатываются технологические базы детали;

ж) когда деталь не имеет поверхностей, удобных для технологического базирования, или конструкторские базы детали – скрытые.

#### 4.5.4 Принцип совмещения и единства баз

Если бы конструктором был задан размер  $V_{\Delta}$  (см. рис. 4.30), т.е. конструкторской базой была бы выбрана поверхность  $V$ , и заготовка устанавливалась бы на эту поверхность при растачивании отверстия, то поверхность  $V$  оказалась бы одновременно конструкторской и технологической базой. При этом станок настраивался бы сразу на размер  $V_{\Delta}$ , и не произошло бы замены одного размера двумя новыми, т.е. не произошло бы смены баз. Отсюда следует, что для обеспечения заданной точности обработки должно соблюдаться два принципа.

*Принцип совмещения баз* – для повышения точности обработки следует совмещать технологические и измерительные базы с конструкторскими.

*Принцип единства баз* – для повышения точности обработки следует стремиться к тому, чтобы по возможности все поверхности детали обрабатывались и измерялись от одних и тех же технологических баз. Перемещение заготовки от одного рабочего места к другому уже является сменой баз, поэтому базирование заготовки по одной и той же схеме на различных операциях позволит снизить вероятность появления дополнительных погрешностей.

#### 4.5.5 Методы получения и измерения расстояний, размеров и относительных поворотов поверхностей деталей

Используются три различных метода получения и измерения размеров, расстояний и относительных поворотов поверхностей деталей.

*Цепной метод.* Сущность цепного метода заключается в том, что каждый последующий размер, расстояние или поворот поверхностей получается или измеряется вслед за ранее полученным или измеренным, причем для этого в качестве одной из технологических или измерительных баз используется связывающая их общая поверхность (рис. 4.31).

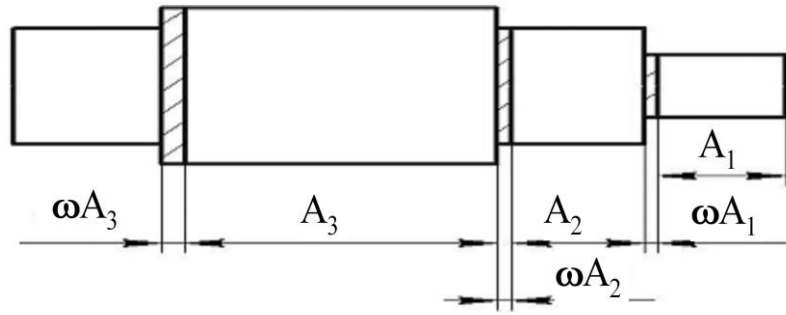


Рис. 4.31. Цепной метод получения и измерения размеров

При получении каждого последующего звена происходит переход к новой технологической базе, и, значит, исключается влияние погрешностей всех предыдущих звеньев на образование погрешности нового звена.

Каждый размер  $A$  образуется вслед за предыдущим, и каждые два размера  $A$  имеют общую базу. Размеры, получаемые цепным методом, называются цепными звеньями.

Основное преимущество этого метода – независимость погрешности, получаемой на каждом цепном звене, от погрешностей других звеньев.

*Координатный метод.* Сущность координатного метода заключается в том, что все размеры, расстояния или повороты поверхностей получаются или измеряются от одной и той же выбранной базы, независимо один от другого (рис. 4.32). Размеры, полученные координатным методом, называются координатными звеньями.

Погрешность, получаемая на каждом из координатных звеньев, не зависит от погрешностей других координатных звеньев.

Этот метод имеет следующие достоинства:

- независимость погрешностей каждого координатного звена от погрешностей других координатных звеньев;
- погрешность установки детали остается постоянной при получении всех координатных звеньев. Другими словами, при этом методе соблюдается принцип единства баз;
- погрешность каждого цепного звена при этом методе равна сумме погрешностей двух координатных звеньев, образующих данное цепное звено (рис. 4.33).

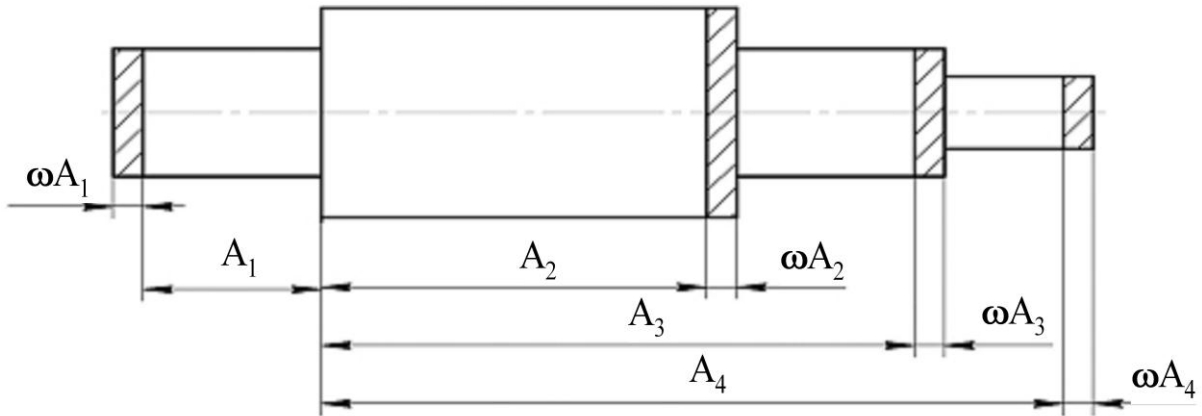


Рис. 4.32. Координатный метод получения и измерения размеров

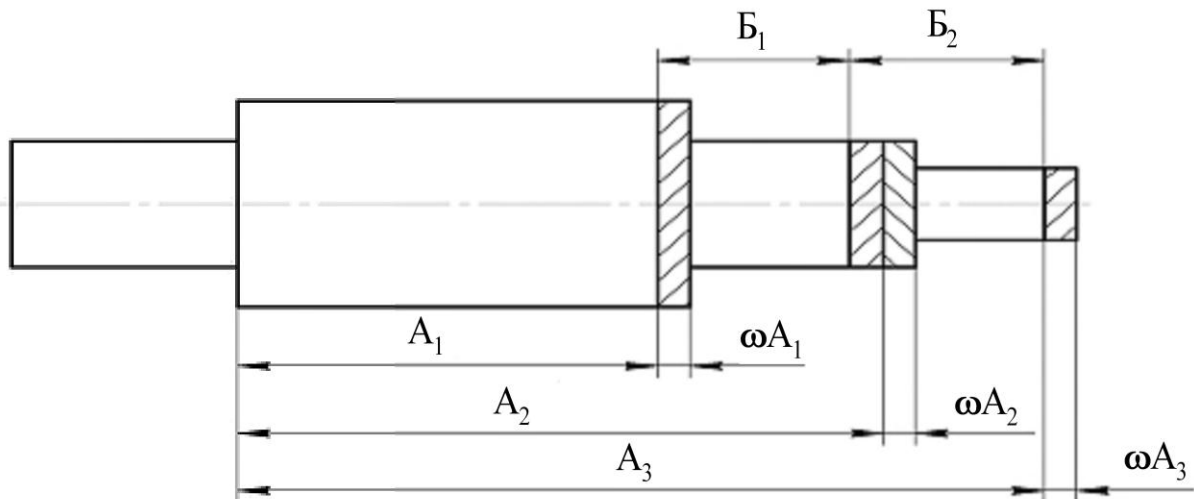


Рис. 4.33. Погрешности цепных звеньев, образованных координатными звеньями

$B_1$  – замыкающее звено размерной цепи  $A_1, A_2$ , следовательно, погрешность звена  $B_1$  составит

$$\omega_{B_1} = \omega_{A_1} + \omega_{A_2}.$$

$B_2$  – замыкающее звено размерной цепи  $A_2, A_3$ , значит

$$\omega_{B_2} = \omega_{A_2} + \omega_{A_3}.$$

Ввиду этих достоинств координатный метод предпочтительнее цепного.

При цепном методе получения координатных звеньев погрешность каждого координатного звена возрастает с увеличением

цепных звеньев, входящих в его состав. При этом погрешности, получаемые на координатных звеньях, т.е. на звеньях полученных от какой-либо одной поверхности, принятой за технологическую базу, зависят от погрешностей цепных звеньев (рис. 4.34).

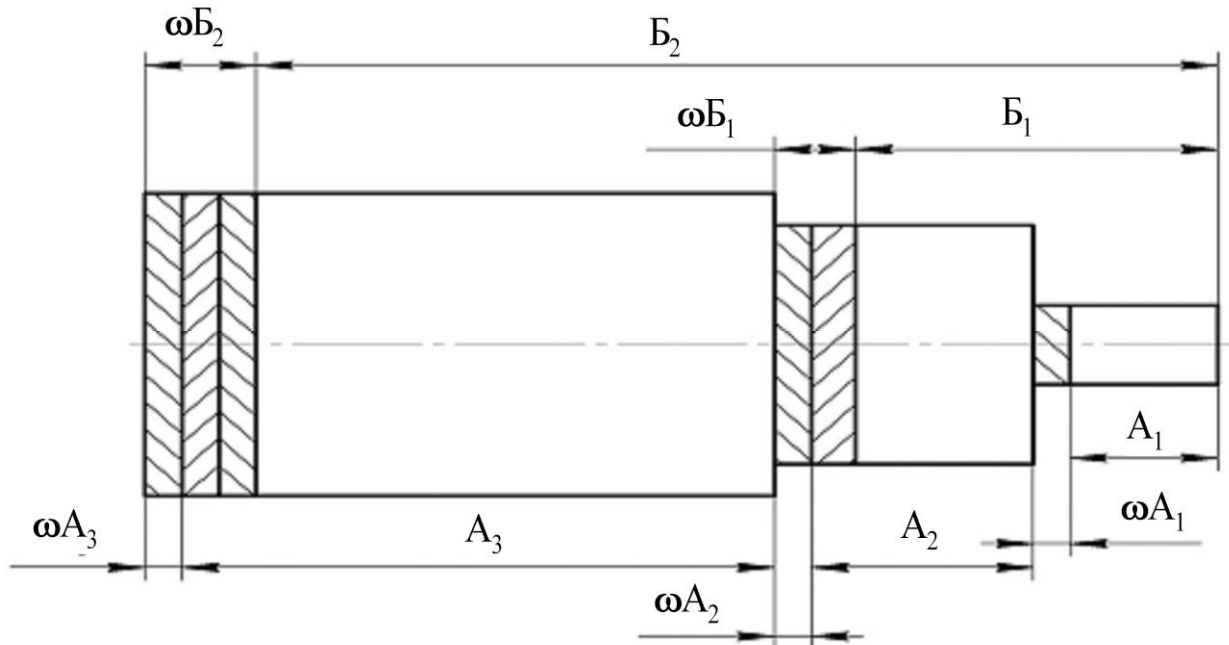


Рис. 4.34. Погрешности координатных звеньев, образованных цепными звеньями

$B_1$  – замыкающее звено размерной цепи  $A_1, A_2$ , поэтому погрешность этого размера составит

$$\omega_{B_1} = \omega_{A_1} + \omega_{A_2}.$$

Аналогично для размера  $B_2$ :

$$\omega_{B_2} = \omega_{A_1} + \omega_{A_2} + \omega_{A_3}.$$

Очевидно, что погрешность каждого координатного звена при цепном методе получения размеров определяется суммой погрешностей цепных звеньев, составляющих его.

Эти погрешности возрастают по мере увеличения количества цепных звеньев, составляющих данное координатное звено.

*Комбинированный метод.* Сущность комбинированного метода заключается в том, что при изготовлении деталей для получения одних звеньев используется координатный метод, а при получении других – цепной.

При этом для получения звеньев, определяющих относительные повороты поверхностей (параллельность, перпендикулярность) и большую часть расстояний, преимущественно используется координатный метод.

Цепной метод используется в следующих случаях:

- когда для отдельных расстояний или поворотов поверхностей требуется обеспечить очень высокую точность;
- когда погрешность установки, связанная со сменой технологических баз, относительно невелика;
- при измерении размеров, расстояний и относительных поворотов поверхностей.

#### 4.5.6 Погрешность измерения

Погрешность измерения характеризует степень приближения познанного размера к величине фактического размера.

Измерение расстояний, размеров, поворотов какой-либо из поверхностей производится относительно других поверхностей – измерительных баз.

Для измерения объект включается в размерные, а иногда и кинематические цепи измерительного инструмента.

Процесс измерения состоит из трех этапов:

- установка;
- настройка системы;
- измерение (динамическая настройка системы).

На каждом этапе возникают свои погрешности, поэтому погрешность измерения включает в себя три составляющих – погрешность установки  $\omega_y$ , погрешность настройки  $\omega_n$  и погрешность динамической настройки  $\omega_d$ :

$$\omega_{\text{изм}} = \omega_y + \omega_n + \omega_d.$$

Основные причины возникновения погрешности установки:

- неправильный выбор измерительных баз;
- отклонения формы поверхностей измерительных баз от геометрического прототипа;
- изношенность баз измерительного инструмента;
- неправильное и неравномерное приложение усилий, обеспечивающих контакт между измерительными базами детали и инструмента;



– недостаточная квалификация лица, производящего измерение.

На этапе настройки размерные и кинематические цепи измерительного инструмента настраиваются на измеряемый размер.

При этом этапы установки и настройки могут меняться местами.

В результате настройки появляется погрешность статической настройки, которая вызывается следующими причинами:

– неправильный выбор используемых для настройки методов и средств;

– погрешность отсчета;

– изношенность измерительного прибора или инструмента;

– недостаточная квалификация лица, производящего измерения.

На последнем этапе – собственно измерения, возникают измерительные усилия, вызывающие погрешность динамической настройки размерных и кинематических цепей системы инструмент – деталь.

Погрешность динамической настройки определяется следующими факторами:

– величиной и колебаниями сил, возникающих в процессе измерения;

– жесткостью измерительного прибора или инструмента;

– температурой и колебаниями температуры детали и измерительного инструмента;

– изношенностью измерительного прибора или инструмента;

– недостаточной квалификацией лица, производящего измерения.

В погрешности измерения могут быть выделены две составляющие – систематическая  $\Delta_{\text{изм}}$  и случайная  $\omega_{\text{T}}$  (рис. 4.35):

$$\omega_{\text{изм}} = \Delta_{\text{изм}} \pm \frac{\omega_{\text{T}}}{2}.$$

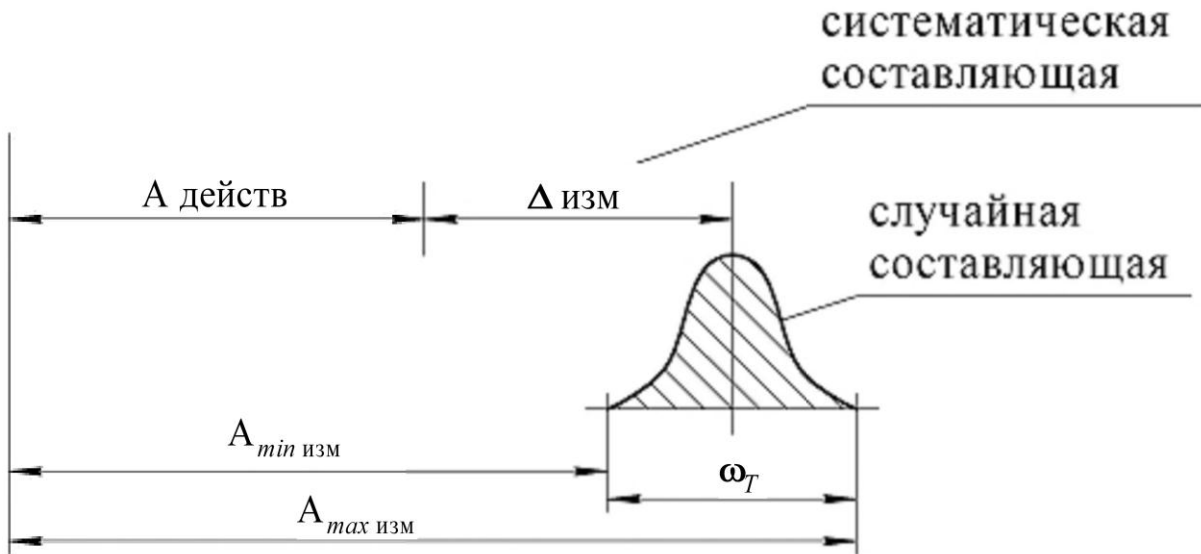


Рис. 4.35. Составляющие погрешности измерения

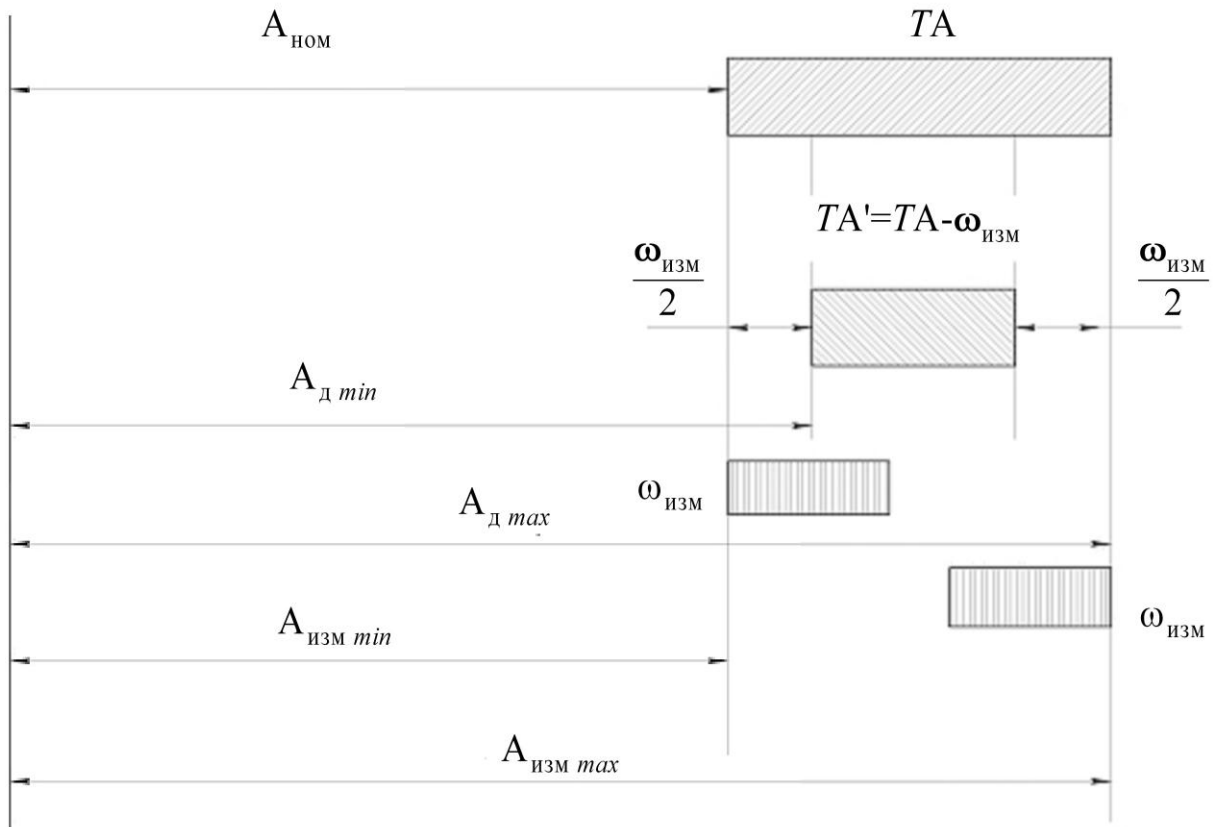
В производственных условиях методы и средства измерения выбираются таким образом, чтобы погрешность измерения составляла 1/10...1/20 часть допуска на измеряемый параметр.

В этом случае погрешностью измерения можно пренебречь.

Если это невозможно, погрешность измерения учитывается через производственный допуск  $TA'$ , определяемый как разность допуска на размер, заданного по чертежу  $TA$  и погрешности измерения  $\omega_{\text{изм}}$ :

$$TA' = TA - \omega_{\text{изм}}.$$

Это означает, что при изготовлении детали задается более жесткий допуск  $TA'$ , позволяющий скомпенсировать погрешность измерения (рис. 4.36).



$A_{НОМ}$  - нормальный размер  
 $A_{д}$  - действительный размер  
 $A_{ИЗМ}$  - измеренный размер

Рис. 4.36. Компенсация погрешности измерения с помощью производственного допуска

## 5 ОСНОВЫ ДОСТИЖЕНИЯ КАЧЕСТВА ДЕТАЛЕЙ МАШИН

В машиностроении изготовление деталей заключается в превращении выбранной заготовки в готовую деталь.

С точки зрения достижения заданной точности задача изготовления детали сводится к «уточнению» размеров и формы заготовки до отклонений, лимитированных допусками на готовую деталь [1].

Под фактическим уточнением  $\varepsilon_{\text{ф}}$  понимается отношение полей рассеивания  $\omega_3$  заготовки партии полуфабрикатов к  $\omega_{\text{д}}$  – полю рассеивания партии готовых деталей рассматриваемой характеристики точности:

$$\varepsilon_{\text{ф}} = \frac{\omega_3}{\omega_{\text{д}}}.$$

Расчетное уточнение

$$\varepsilon_{\text{р}} = \frac{T_3}{T_{\text{д}}},$$

где  $T_3$  – допуск на рассматриваемую характеристику точности партии заготовок;  $T_{\text{д}}$  – допуск на рассматриваемую характеристику партии готовых деталей.

Обратное отношение

$$\zeta = \frac{1}{\varepsilon} = \frac{\omega_{\text{д}}}{\omega_3}$$

называется передаточным отношением технологической системы «Станок – Приспособление – Инструмент – Деталь».

Для достижения требуемой точности партии деталей необходимо найти такую технологическую систему, пройдя которую партия деталей получилась бы годной. В настоящее время таких технологических систем очень мало. Поэтому приходится использовать ряд технологических систем, каждая из которых дает свою величину уточнения  $\varepsilon$ .

Если каждая из технологических систем имеет свое уточнение  $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_m$ , то партия заготовок, пройдя  $m$  технологических систем, будет иметь уточнение:

$$\varepsilon = \varepsilon_1 \cdot \varepsilon_2 \cdot \dots \cdot \varepsilon_m = \prod_{m=1}^m \varepsilon_m.$$

Для получения годных деталей необходимо, чтобы

$$\frac{\omega_3}{\varepsilon} \leq T_{\text{д}} \quad \text{или} \quad \frac{\omega_3}{\prod_{m=1}^m \varepsilon_m} \leq T_{\text{д}}.$$

Точность детали характеризуется рядом показателей – точностью размеров, относительных поворотов, формы поверхностей. Поэтому необходимо найти технологическую систему, которая обеспечивала бы достижение сразу всех показателей точности.

Практически такую систему найти трудно, поэтому приходится заготовку пропускать последовательно через ряд технологических систем, из которых одни обеспечивают достижение точности по одним ее показателям, другие – по другим.

Анализ методов достижения точности замыкающих звеньев размерных цепей технологической системы показал [1], что *требуемая точность расстояний между поверхностями деталей или размеров поверхностей, как правило, достигается методом регулирования, а точность относительных поворотов поверхностей обрабатываемой детали – методом полной или неполной взаимозаменяемости* (рис. 5.1).

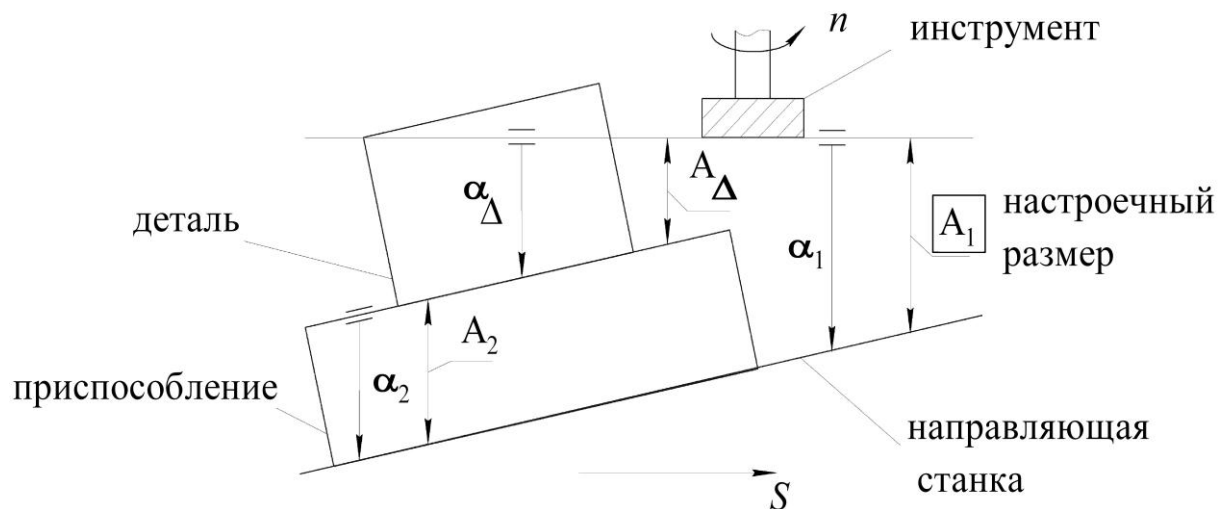


Рис. 5.1 Методы достижения различных показателей точности детали при обработке

В примере, показанном на рис. 5.1, а необходимо после обработки получить размер  $A_{\Delta}$  и параллельность обработанной поверхности  $\alpha_{\Delta}$  относительно технологической базы детали. Для решения этой задачи заготовка в первую очередь должна быть установлена в технологической системе, т.е. должна занять требуемое положение относительно баз станка – направляющих. Так как неудобно использовать направляющие станка непосредственно для установки различных по конфигурации заготовок, для установки заготовок используется стол станка, имеющий необходимые поверхности (плоскость и Г-образные пазы), либо приспособление. Поэтому требуемые линейные и угловые размеры при обработке получаются, как замыкающие звенья размерных цепей  $A$  и  $\alpha$  (см. рис. 5.1). При этом их погрешности составят

$$\omega_{A_{\Delta}} = \omega_{A_1} + \omega_{A_2}; \quad \omega_{\alpha_{\Delta}} = \omega_{\alpha_1} + \omega_{\alpha_2}.$$

После этого технологическая система должна быть настроена на получаемые размеры. Для этого любой станок имеет механизмы, позволяющие изменять положение режущих кромок инструмента относительно баз станка. Следовательно, *точность линейных размеров ( $A_{\Delta}$ ) получается методом регулирования ( $A_1$  – компенсирующее звено, размер, на который настраивается станок)*. Точность углового положения обрабатываемой поверхности  $\alpha_{\Delta}$  зависит от того, насколько траектория движения режущих кромок инструмента параллельна плоскости стола (рис. 5.1). Станки, как правило, не имеют механизмов, позволяющих регулировать направление этой траектории относительно направляющих или плоскости стола. Поэтому *точность углового положения обрабатываемых поверхностей в подавляющем большинстве случаев обеспечивается точностью самого станка, т.е. методами полной либо неполной взаимозаменяемости*.

После того как заготовка установлена в технологической системе и система настроена на получаемый размер, может быть произведена непосредственно обработка детали.

В соответствии с изложенным, процесс достижения точности обрабатываемой детали делится на три этапа.

1. *Установка* заготовки на станке: заготовка включается в размерные и кинематические цепи технологической системы.

Возникает размер установки  $A_y$  как расстояние от технологической базы заготовки до базы станка (плоскости стола). В ряде случаев номинальное значение этого размера равно нулю. Поскольку базовая поверхность заготовки может прилегать к поверхности стола неплотно (на отдельных участках), возникает неопределенность базирования, приводящая к возникновению погрешности установки  $\omega_y$  как величине несовмещения баз заготовки и станка (рис. 5.2).

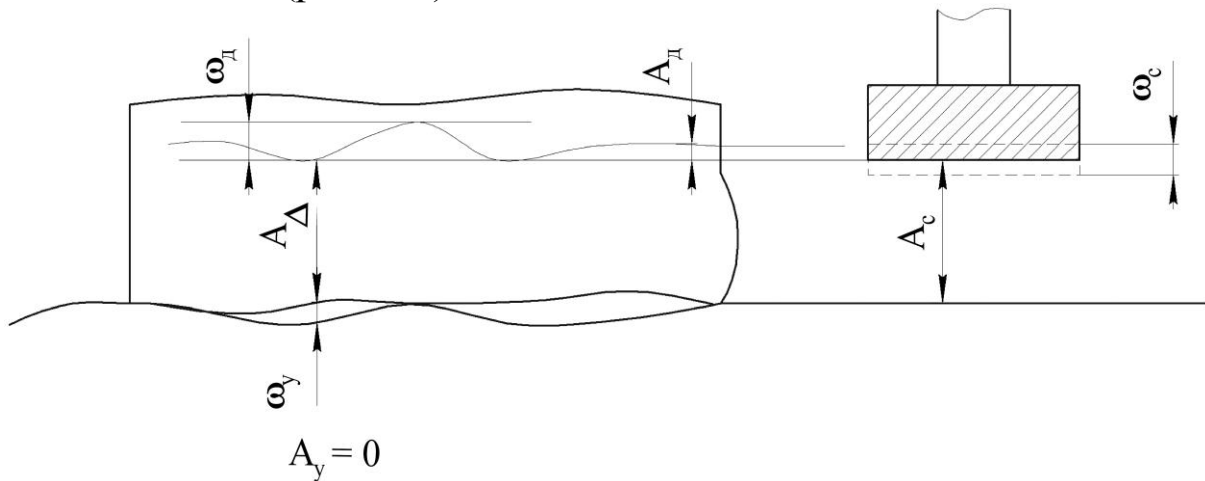


Рис. 5.2. Получение точности размера обрабатываемой детали

2. *Статическая настройка* технологической системы – подведение и установка режущих кромок инструмента на получаемый размер. Производится статическая настройка размерных и кинематических цепей технологической системы при отсутствии рабочих нагрузок в системе. При этом появляется размер статической настройки  $A_c$  технологической системы как расстояние от режущих кромок инструмента до баз станка. Этот размер будет получен с погрешностью, которая называется погрешность статической настройки  $\omega_c$  (см. рис. 5.2).

3. *Динамическая настройка* технологической системы – обработка детали. Происходит динамическая настройка размерных и кинематических цепей технологической системы, так как при обработке возникают силы резания, упруго деформирующие технологическую систему. В результате упругих деформаций всех элементов технологической системы происходит упругое отжатие режущих кромок инструмента от обрабатываемой поверхно-

сти, и появляется размер динамической настройки  $A_d$  как величина этого упругого отжатия. Поскольку величины сил, действующих в процессе обработки, колеблются, величина упругого отжатия режущих кромок инструмента также не остается постоянной. Колебания величины упругого отжатия режущих кромок инструмента относительно обрабатываемой поверхности – это погрешность размера динамической настройки  $\omega_d$  (см. рис. 5.2).

Следовательно, размер готовой детали после обработки  $A_\Delta$  получается как замыкающее звено размерной цепи, состоящей из размеров установки, статической и динамической настройки технологической системы (см. рис. 5.2). Величина этого размера равна *алгебраической сумме* составляющих звеньев

$$A_\Delta = A_y + A_c + A_d.$$

Погрешность размера детали, полученного после обработки, представляет собой *арифметическую сумму* погрешностей, возникающих на каждом этапе достижения точности детали:

$$\omega_{A_\Delta} = \omega_y + \omega_c + \omega_d.$$

Каждая из этих погрешностей порождается большим количеством факторов, и состоит из ряда случайных и систематических составляющих.

Основные причины возникновения погрешности установки  $\omega_y$  следующие:

- неправильный выбор технологических баз заготовки;
- погрешности размеров, формы и относительных поворотов технологических баз заготовки;
- погрешности размеров, формы и относительных поворотов исполнительных поверхностей станка, приспособления;
- неправильное использование правила шести точек при определении схемы базирования заготовки;
- неправильное силовое замыкание при закреплении заготовки;
- неправильный выбор измерительных баз, методов и средств измерения при установке;
- неорганизованная смена баз в процессе закрепления заготовки;
- недостаточная квалификация рабочего.



Основными причинами возникновения погрешности статической настройки  $\omega_c$  технологической системы являются:

- неправильный выбор технологических баз заготовки;
- неправильный выбор измерительных баз и метода измерения при статической настройке технологической системы;
- неправильный выбор метода и средств статической настройки размерных и кинематических цепей системы;
- неправильная установка режущих кромок инструмента относительно исполнительных поверхностей станка;
- неправильная установка приспособлений, служащих для установки и закрепления режущего инструмента и заготовки;
- недостаточная геометрическая точность оборудования;
- недостаточная квалификация рабочего.

Основными причинами, порождающими погрешность динамической настройки технологической системы  $\omega_d$ , являются:

- неоднородность качества материалов обрабатываемых заготовок;
- колебания припусков на обработку;
- недостаточная жесткость технологической системы;
- низкое качество и износ режущего инструмента;
- изношенность оборудования и приспособлений;
- колебания температуры заготовки, инструмента, оборудования;
- неправильное применение и недостаточное количество смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ);
- неправильный выбор методов и средств измерения размера динамической настройки технологической системы;
- вибрации технологической системы;
- недостаточная квалификация рабочего.

### 5.1 Сокращение погрешности установки

Одна из главных причин, вызывающих появления погрешностей установки, – неправильный выбор технологических и измерительных баз.

### 5.1.1 Основы выбора технологических баз

Основным требованием при выборе технологических баз является соблюдение *принципа совмещения баз*: технологические базы при обработке каждой поверхности детали должны быть совмещены с конструкторскими. Это значит, что в качестве технологических баз следует выбирать поверхности детали, относительно которых задано положение обрабатываемых поверхностей.

При этом для получения требуемой точности размера безразлично, которая из двух поверхностей, ограничивающих данный размер, выбирается в качестве технологической базы.

При получении точности относительных поворотов поверхностей возникает задача координирования как минимум двух поверхностей различных габаритных размеров.

В примере на рис. 5.3 требуется обеспечить минимальное отклонение от параллельности поверхности А относительно поверхности Б.

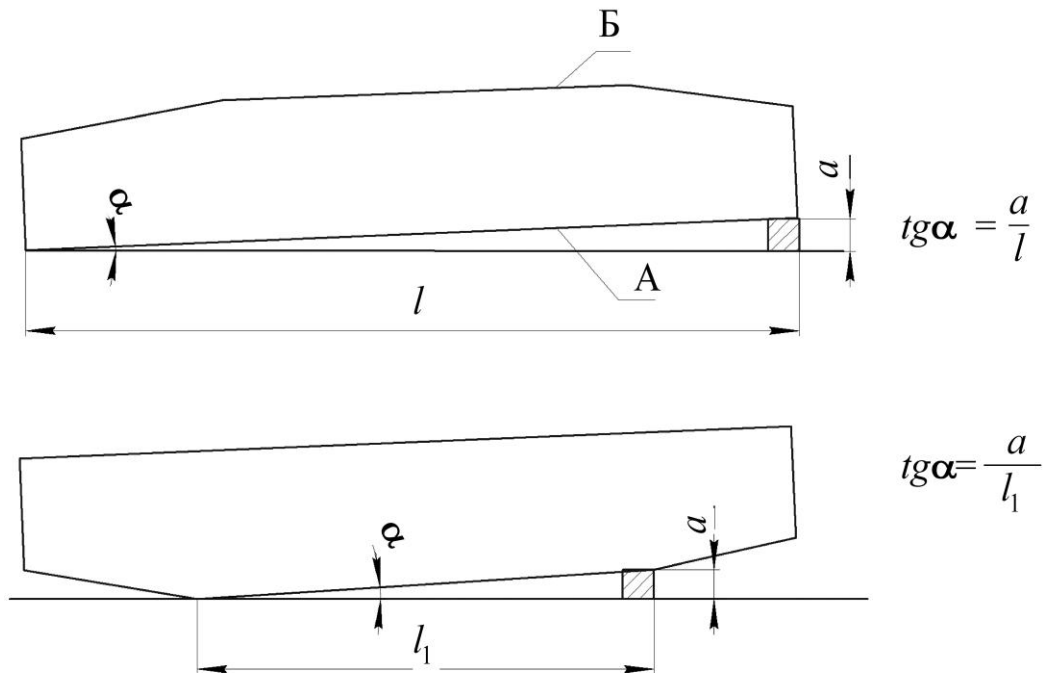


Рис. 5.3. Зависимость погрешности относительного поворота поверхностей от габаритных размеров технологических баз

Отклонение от заданного направления измеряется величиной тангенса угла  $\alpha$  между прямой, указывающей заданное

направление (база станка), и прямой, указывающей фактически полученное направление (технологической базой детали). С уменьшением  $\operatorname{tg}\alpha$  фактическое направление приближается к заданному, т.е. увеличивается точность относительного поворота поверхностей. Очевидно (рис. 5.3), что при одной и той же погрешности  $a$  установки заготовки, появившейся, например, из-за попадания стружки, точность относительного поворота поверхности А относительно поверхности Б будет выше при базировании заготовки на поверхность А.

Отсюда следует, что для достижения наибольшей точности поворота одной поверхности относительно другой в каждой из координатных поверхностей следует в качестве направляющей технологической базы использовать поверхность наибольшей протяженности.

Установочная база служит для координирования детали в двух перпендикулярных координатных поверхностях, поэтому в качестве установочной технологической базы используется поверхность наибольших габаритных размеров.

В качестве опорной технологической базы следует использовать погрешность наименьших геометрических размеров.

Отсюда следует (см. рис. 5.3), что при разработке технологического процесса необходимо в первую очередь выбирать технологические базы для достижения относительных поворотов поверхностей обрабатываемой детали и лишь затем выбирать технологические базы для достижения точности размеров детали.

При выборе технологических баз детали условно делятся на две группы.

К первой группе относятся детали, к которым при сборке машины присоединяется не более одной детали (либо ни одной, либо только одна). Детали этой группы имеют один комплект основных баз и не более одного комплекта вспомогательных баз.

Ко второй группе относятся детали, к которым при сборке машины присоединяется две и более деталей. Детали этой группы имеют один комплект основных баз и два и более комплекта вспомогательных баз. Это детали более сложной конструкции.

К первой группе относятся рычаги, шатуны, серьги, валики, кронштейны, крышки, шкивы и др. Ко второй группе относятся остальные детали, имеющие более сложную конструкцию.

### ***Выбор технологических баз деталей первой группы.***

Для деталей этой группы выбор технологических баз относительно прост:

1. В первую очередь в качестве технологических баз следует выбирать обрабатываемые поверхности, наиболее удобные для базирования, независимо от того, принадлежат ли эти поверхности основным, вспомогательным базам либо это исполнительные поверхности.

2. Если конструкция позволяет обработать всю деталь за одну установку, в качестве технологических баз могут быть выбраны любые свободные необрабатываемые поверхности.

3. Выбор схемы базирования диктуется задачей, поставленной при обработке детали [1, 2].

### ***Выбор технологических баз деталей второй группы.***

Эти детали имеют большое количество вспомогательных баз и исполнительных поверхностей, поэтому перед выбором технологических баз деталей этой группы следует изучить служебное назначение детали в машине и установить все виды связей между поверхностями.

В большинстве случаев служебным назначением таких деталей задаются требования по обеспечению положения исполнительных поверхностей и вспомогательных баз относительно основных конструкторских баз. Поэтому *в качестве технологических баз следует использовать основные конструкторские базы деталей, соблюдая принцип единства баз на всех операциях.*

В ряде случаев эта рекомендация не выполняется.

1. Существуют детали, при обработке которых требуется обеспечить более высокую точность положения ряда поверхностей относительно какого-либо комплекта вспомогательных баз или исполнительных поверхностей, чем относительно основных баз. В качестве технологических баз выбираются те вспомогательные базы или исполнительные поверхности, относительно которых задано точное положение большинства других вспомогательных баз.

2. Поверхности основных конструкторских баз малы и неудобны для использования в качестве технологических баз. В этом случае в качестве технологических баз используются наиболее удобные вспомогательные базы: производится организованная смена баз.

3. Некоторые детали имеют такие конструктивные формы, что в качестве технологических баз неудобно использовать ни основные, ни вспомогательные базы, ни исполнительные поверхности детали. В таких случаях создаются искусственные технологические базы, например, центровые отверстия валов.

Иногда такие детали оснащаются приливами, бобышками, которые после соответствующей обработки служат в качестве технологических баз и затем могут быть удалены.

4. При обработке детали на первой операции, когда обрабатываются технологические базы для последующих операций.

#### 5.1.2 Выбор технологических баз для первой операции обработки детали

На первую операцию механической обработки заготовка приходит, не имея обработанных поверхностей, поэтому имеется большое количество вариантов технологического базирования заготовок. Вместе с тем, известно, что *на необработанные поверхности заготовка может базироваться один единственный раз – на первой операции*. Как только появилась первая обработанная поверхность, она обязательно должна быть использована в качестве технологической базы. Поэтому на первой операции механической обработки производится обработка баз для последующих операций.

При этом возникает задача выбора технологических баз для первой операции.

*Роль и значение первой операции механической обработки детали заключается в том, что выбор технологических баз для первой операции определяет качество детали, себестоимость и трудоемкость ее последующей обработки.*

Вместе с тем, выбор баз для первой операции представляет собой сложную задачу, так как ее решение предопределяется целью, которую технолог ставит при проектировании технологического процесса обработки детали.

При выборе баз для первой операции решается одна из двух задач (либо одна, либо другая).

1. *Распределение фактически имеющегося припуска на обработку между поверхностями, подлежащими обработке.*

2. *Определение относительного положения обрабатываемых и необрабатываемых поверхностей детали.*

При решении *первой задачи* руководствуются одним из трех основных положений:

- необходимостью сохранения плотного однородного слоя материала на поверхностях детали, которые подвергаются при ее работе наиболее интенсивному износу, с целью стабильности их износостойкости;

- необходимостью равномерного распределения припуска под обработку на определенной поверхности;

- необходимостью увеличения производительности обработки путем сокращения объема материала, подлежащего удалению в процессе обработки с определенной поверхности.

Примером для *первого положения* может служить выбор технологических баз на первой операции обработки станины токарного станка. Станины отливают направляющими вниз, чтобы получить на направляющих наиболее плотный и однородный слой металла.

Значит, для обеспечения стабильной износостойкости направляющих с них необходимо снять равномерный и небольшой слой металла. Базирование станины на поверхности опор для обработки (строгания) направляющих на операции, например № 100, определяется следующей схемой (рис. 5.4). Для обеспечения равномерного припуска под обработку погрешность относительного поворота заготовки направляющих  $\alpha_{\Delta}$  должна быть минимальной.

При обработке поверхностей опор на первой операции при выборе технологических баз для обработки опор возможны следующие варианты.

*Вариант 1.* Заготовка для обработки поверхностей опор базируется на промежуточные ребра жесткости станины. Схема базирования заготовки для первой операции представлена на рис. 5.5, а. В этом случае настройкой станка будет обеспечена

параллельность плоскости опор относительно поверхности промежуточных ребер жесткости станины  $\beta_{\Delta}$ .

операция 100

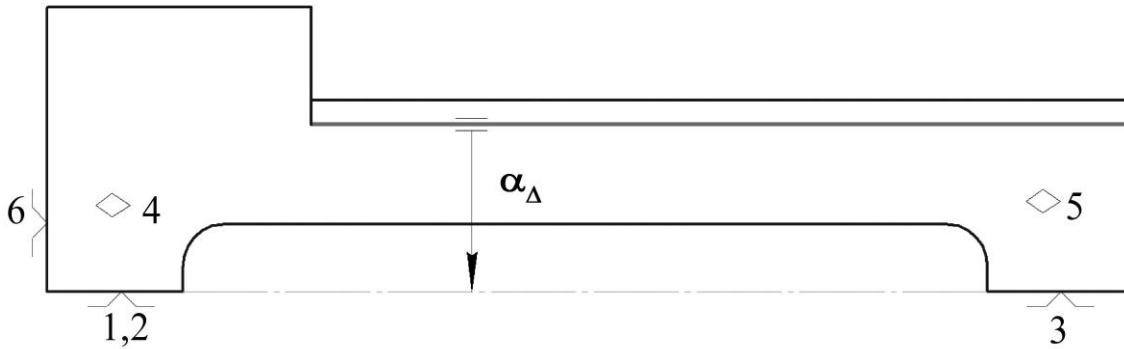
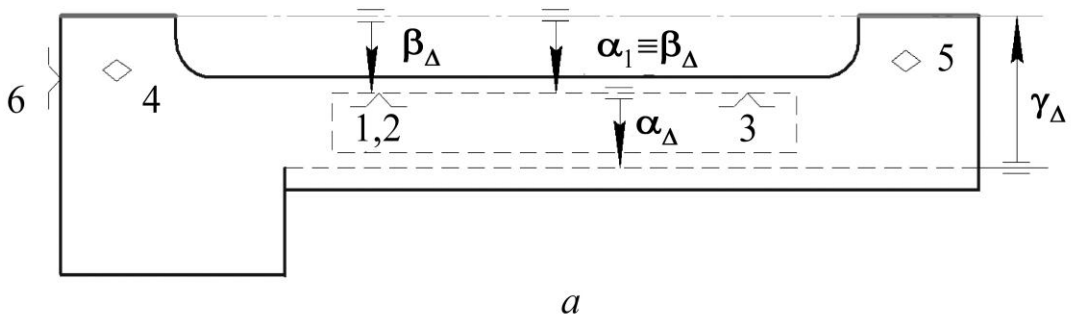


Рис. 5.4. Базирование станины токарного станка на операции строгания направляющих

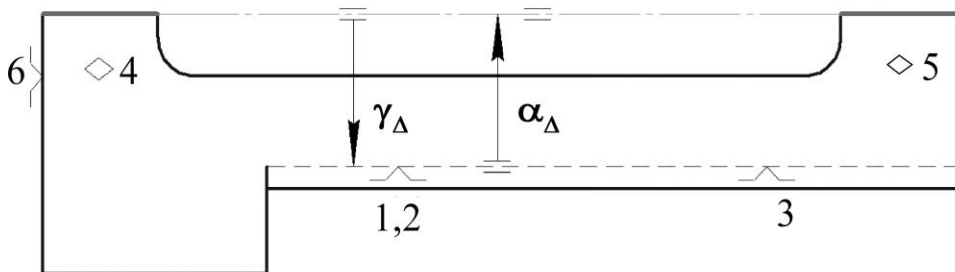
операция 05

1-ый вариант



операция 05

2-ой вариант



б

Рис. 5.5. Варианты базирования заготовки на первой операции

При этом на операции № 100 угол поворота направляющих  $\alpha_{\Delta}$  относительно обрабатываемых поверхностей опор будет представлять собой замыкающее звено  $\alpha_{\Delta}$  размерной цепи, включающей в себя составляющие звенья  $\alpha_1$  – параллельность плоскости опор относительно поверхности промежуточных ребер жесткости станины и  $\alpha_2$  – параллельность поверхности промежуточных ребер относительно направляющих заготовки.

Неравномерность припуска под обработку направляющих станка  $\omega_{\alpha_{\Delta}}$  в этом случае будет равна погрешности углового размера  $\alpha_{\Delta}$  (см. рис. 5.5, а):

$$\omega_{\alpha_{\Delta}} = \omega_{\alpha_1} + \omega_{\alpha_2},$$

где  $\omega_{\alpha_1}$  – погрешность настройки станка, обрабатывающего поверхности опор;  $\omega_{\alpha_2}$  – погрешность заготовки станины, определяющая отклонение от параллельности поверхностей направляющих заготовки относительно поверхностей промежуточных ребер (погрешность отливки).

*Вариант 2.* Заготовка для обработки поверхностей опор базируется на поверхности будущих направляющих.

Схема базирования заготовки для первой операции представлена на рис. 5.5, б. В этом случае настройкой станка будет обеспечена параллельность плоскости опор относительно поверхности направляющих заготовки  $\gamma_{\Delta}$ . Неравномерность припуска под обработку направляющих станка  $\omega_{\alpha_{\Delta}}$  будет равна погрешности углового размера настройки  $\gamma_{\Delta}$ :

$$\omega_{\alpha_{\Delta}} = \omega_{\gamma_{\Delta}},$$

т.е. погрешности настройки станка, обрабатывающего плоскость опор.

При этом на операции № 100 угол поворота направляющих  $\alpha_{\Delta}$  относительно поверхностей опор будет равен углу  $\gamma_{\Delta}$ , полученному на первой операции механической обработки.

Очевидно, что второй вариант базирования заготовки на первой операции (см. рис. 5.5, б) обеспечивает более равномерный припуск под обработку направляющих станка в середине технологического процесса.



*Второе положение* – необходимость равномерного распределения припуска на обработку, иллюстрируется следующим примером. Неравномерный припуск всегда порождает колебания силы резания, вызывающие вибрации и упругие деформации технологической системы. Например, при растачивании отверстия в детали (рис. 5.6), ось отверстия в заготовке не совпадает с осью растачивания настроенного инструмента. Это приведет к тому, что при снятии наименьшего слоя материала отжатие режущих кромок расточной оправки будет наименьшим, а при снятии наибольшего слоя материала отжатие будет наибольшим. В результате произойдет «копирование» погрешности заготовки на размер готовой детали, и отверстие после растачивания потеряет форму, и его ось окажется смещенной относительно оси вращения режущего инструмента. Это явление получило название «технологического наследования» показателей качества деталей.

Выходом из этого положения представляется либо снижение режимов обработки (уменьшение глубины резания) и, как следствие, увеличение трудоемкости обработки, либо обеспечение постоянства припуска в обрабатываемом отверстии.

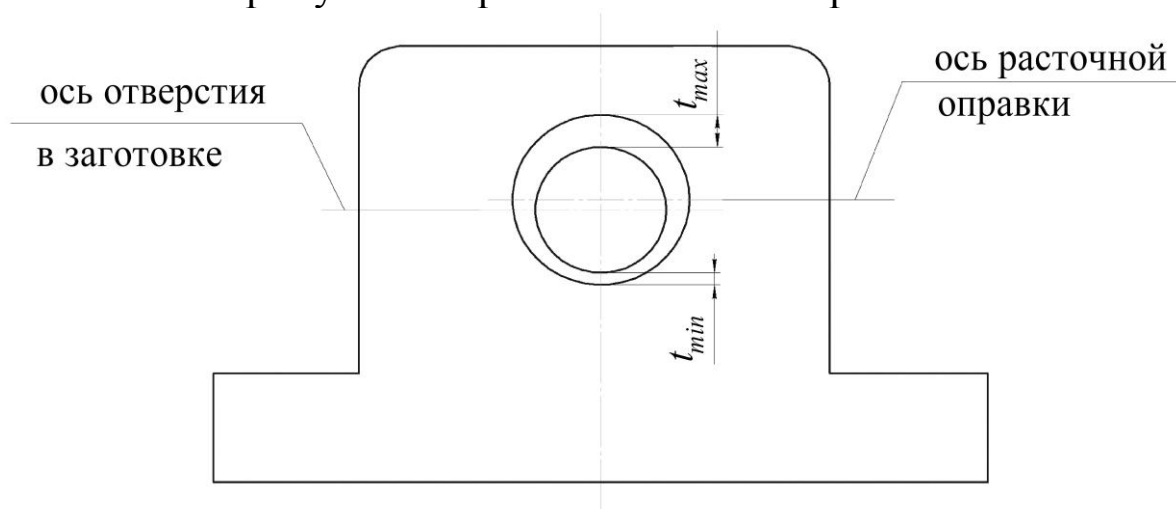


Рис. 5.6. Технологическое наследование погрешности заготовки

Растачивание отверстия (рис. 5.6) производится в середине технологического процесса (операция № 100) при базировании в соответствии со схемой, представленной на рис. 5.7.

операция 100

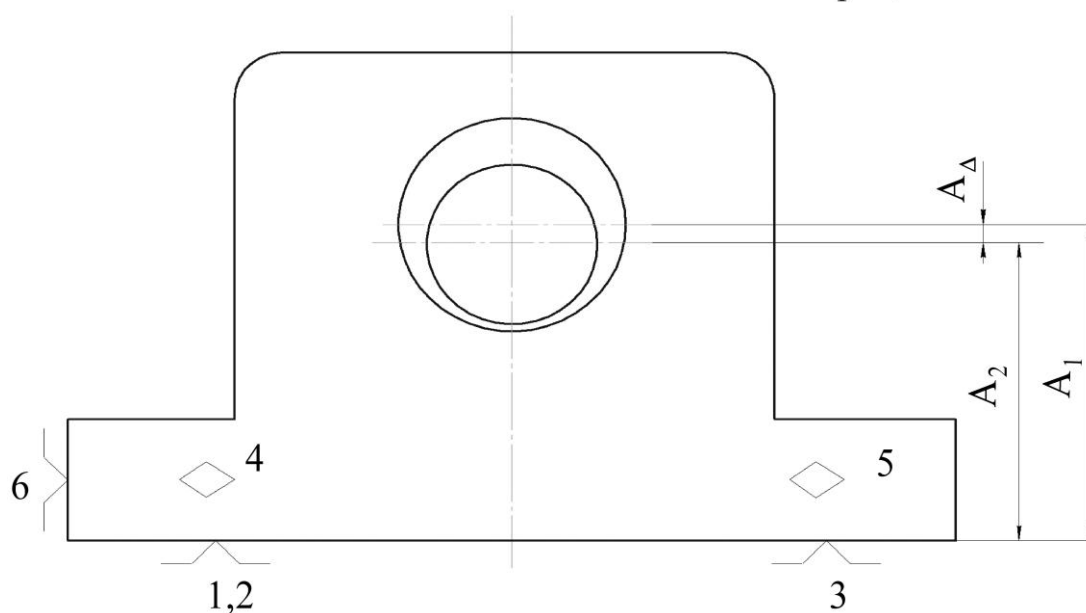


Рис. 5.7. Базирование заготовки при растачивании отверстия

При этом неравномерность припуска при растачивании отверстия определяется несовмещением оси отверстия в заготовке и оси вращения расточного инструмента. Это несовмещение – размер  $A_{\Delta}$ , является замыкающим звеном размерной цепи, включающей размер  $A_1$  – размер настройки расточного инструмента, и размер  $A_2$  – размер от оси отверстия заготовки до технологической базы, полученный на первой операции. При этом неравномерность припуска при растачивании отверстия составит

$$\omega_{A_{\Delta}} = \omega_{A_1} + \omega_{A_2},$$

где  $\omega_{A_1}$  и  $\omega_{A_2}$  – погрешности размеров  $A_1$  и  $A_2$ .

При обработке этой технологической базы на первой операции возможны следующие варианты базирования (рис. 5.8).

*Вариант 1* (рис. 5.8, а). Заготовка на первой операции базировается на удобные поверхности полкок. В этом случае размер  $A_2$  после обработки технологической базы получается как размер  $B_{\Delta} \equiv A_2$  – замыкающее звено размерной цепи, получающейся на первой операции. При этом звено  $B_1$  – настроечный размер при обработке технологической базы на первой операции; звено  $B_2$  – размер, принадлежащий заготовке – расстояние от необработан-

ной поверхности полков, используемых при базировании, до оси отверстия в заготовке.

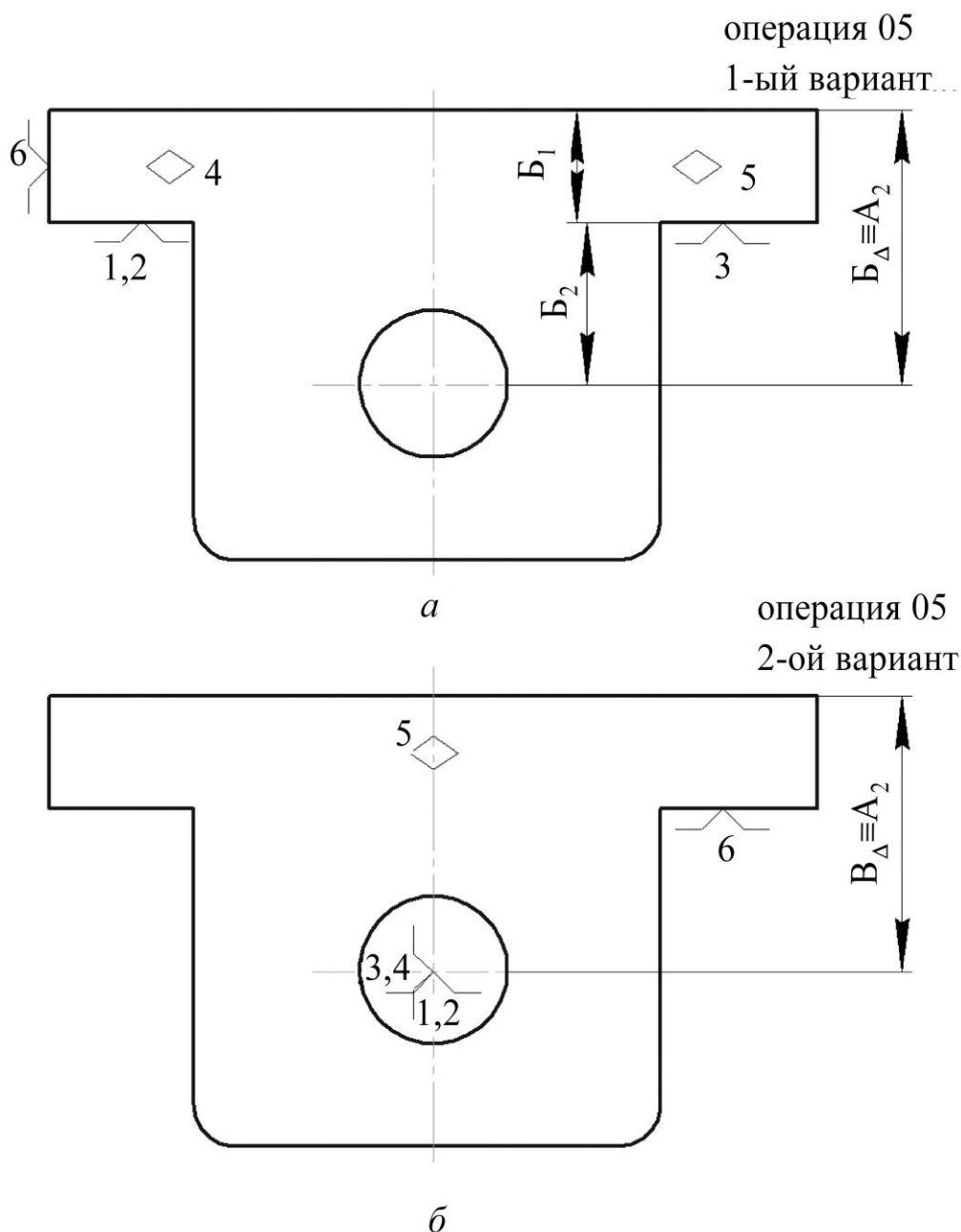


Рис. 5.8 Варианты базирования заготовки на первой операции

Погрешность размера  $B_{\Delta}$ , становящаяся погрешностью размера  $A_2$  на операции № 100 представляет собой

$$\omega_{A_2} = \omega_{B_{\Delta}} = \omega_{B_1} + \omega_{B_2},$$

где  $\omega_{B_1}$  и  $\omega_{B_2}$  – погрешности размеров  $B_1$  и  $B_2$ .

В этом случае неравномерность припуска при растачивании отверстия составит (рис. 5.7)

$$\omega_{A_{\Delta}} = \omega_{A_1} + \omega_{A_2} = \omega_{A_1} + \omega_{B_1} + \omega_{B_2}.$$

*Вариант 2* (см. рис. 5.8, б). Заготовка на первой операции при обработке нижней плоскости базируется по оси отверстия заготовки, например, с помощью двух конусов, один из которых неподвижен, а второй, перемещаясь, производит закрепление заготовки. Схема базирования выглядит следующим образом (рис. 5.8, б).

В этом случае размер  $B_{\Delta}$ , получаемый на первой операции, и становящийся размером  $A_2$  на операции № 100, получается, как настроечный размер операции обработки плоскости на первой операции, и его погрешность составляет

$$\omega_{A_2} = \omega_{B_{\Delta}} = \omega_{\text{настройки}}.$$

В этом случае неравномерность припуска при растачивании отверстия (см. рис. 5.7) составит

$$\omega_{A_{\Delta}} = \omega_{A_1} + \omega_{A_2} = \omega_{A_1} + \omega_{B_{\Delta}}.$$

Очевидно, что второй вариант базирования заготовки на первой операции обработки обеспечит более равномерный припуск при растачивании отверстия в середине технологического процесса (на операции № 100).

Обеспечение равномерности припуска на обрабатываемых поверхностях деталей позволяет:

- повысить точность обработки на первых черновых операциях и тем самым сократить количество переходов и рабочих ходов;
- сократить расходы на обработку, так как можно использовать станки меньшей точности и мощности;
- увеличить производительность обработки на последующих операциях.

*Другая задача* – установление размерных связей между обрабатываемыми и необрабатываемыми поверхностями детали – также решается при выборе для баз первой операции обработки детали.

Необходимость установления этих связей у деталей вызывается требованиями служебного назначения детали.

В качестве примера (рис. 5.9) рассматривается необходимость обеспечения расстояния от оси обрабатываемого отверстия корпуса до внутренней необрабатываемой поверхности корпуса,

для того, чтобы зубчатые колеса, монтируемые в корпусе, не «цепляли» эту внутреннюю поверхность.

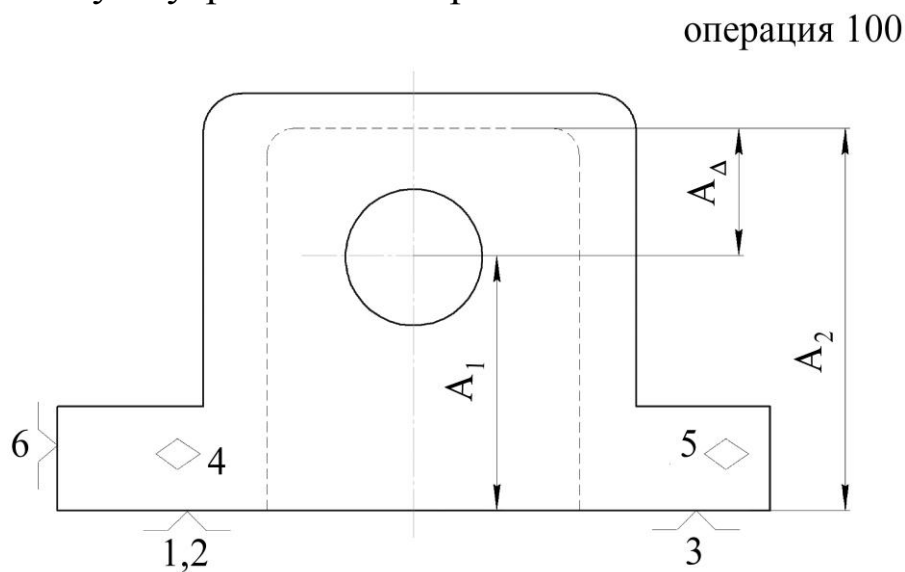


Рис. 5.9. Получение расстояния от оси обрабатываемого отверстия до внутренней необрабатываемой поверхности корпуса

При выбранной схеме базирования (см. рис. 5.9) расстояние от оси обрабатываемого отверстия до необрабатываемой внутренней поверхности  $A_{\Delta}$  получается как замыкающее звено размерной цепи, включающей в себя размер  $A_1$  – размер настройки расточного станка, и размер  $A_2$  – размер от внутренней поверхности заготовки до технологической базы, полученной на первой операции. При этом погрешность размера  $A_{\Delta}$  составит

$$\omega_{A_{\Delta}} = \omega_{A_1} + \omega_{A_2},$$

где  $\omega_{A_1}$  и  $\omega_{A_2}$  – погрешности размеров  $A_1$  и  $A_2$ .

Рассмотрим предыдущие варианты базирования заготовки на первой операции обработки нижней плоскости (технологической базы для последующих операций).

*Вариант 1* (рис. 5.10, а). Заготовка на первой операции базируется на удобные поверхности полков. В этом случае размер  $A_2$  после обработки технологической базы получается как размер  $B_{\Delta} \equiv A_2$  – замыкающее звено размерной цепи, получающейся на первой операции. При этом звено  $B_1$  – настроечный размер при обработке технологической базы на первой операции; звено

$B_2$  – размер, принадлежащий заготовке – расстояние от необработанной поверхности полков, используемых при базировании, до внутренней необработанной поверхности заготовки.

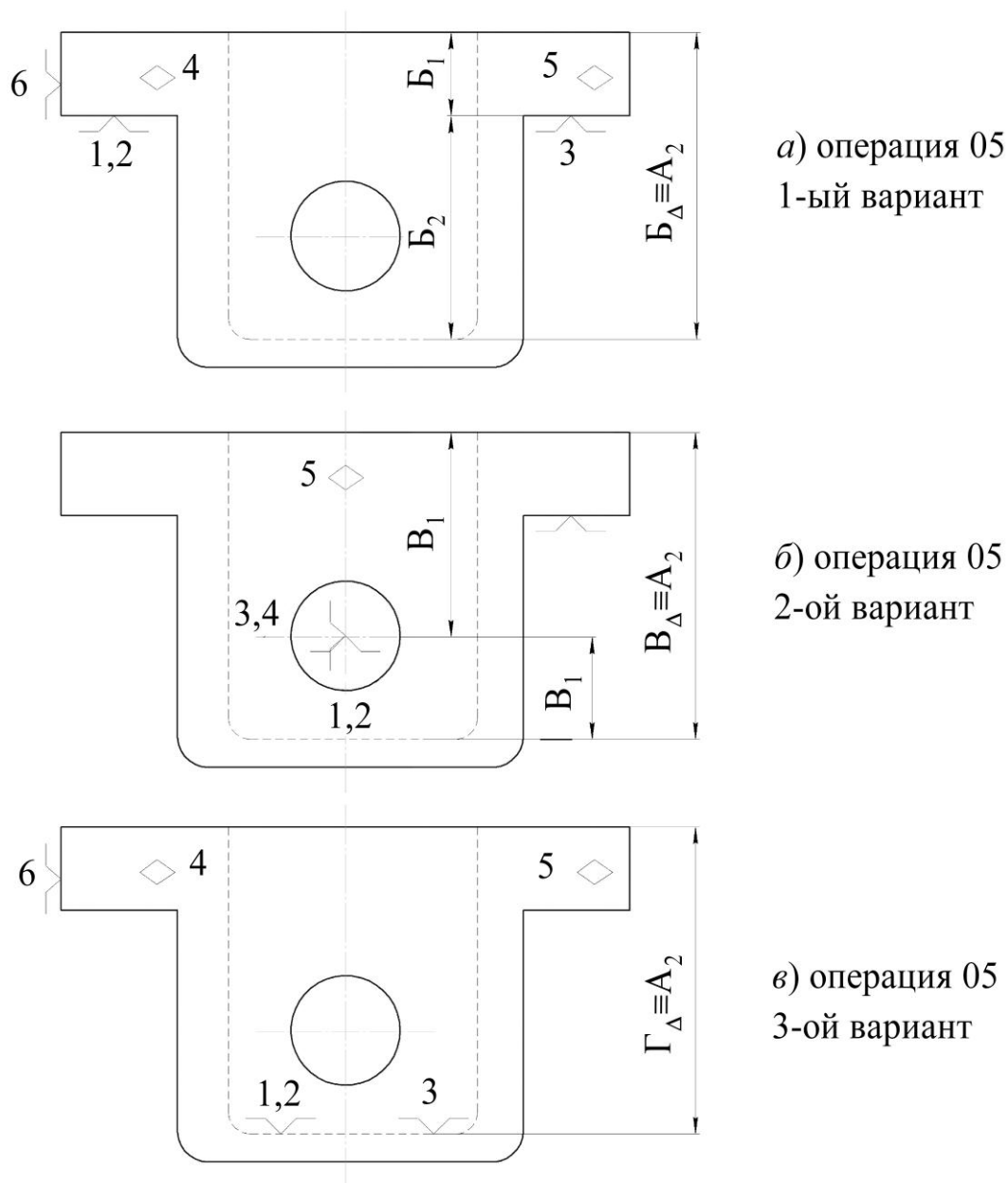


Рис. 5.10. Базирование заготовки

Погрешность размера  $B_{\Delta}$ , становящаяся погрешностью размера  $A_2$  на операции № 100 представляет собой

$$\omega_{A_2} = \omega_{B_{\Delta}} = \omega_{B_1} + \omega_{B_2},$$

где  $\omega_{B_1}$  и  $\omega_{B_2}$  – погрешности размеров  $B_1$  и  $B_2$ .

В этом случае погрешность размера  $A_\Delta$  (рис. 5.9) составит

$$\omega_{A_\Delta} = \omega_{A_1} + \omega_{A_2} = \omega_{A_1} + \omega_{B_1} + \omega_{B_2}.$$

*Вариант 2* (рис. 5.10, б). Заготовка на первой операции при обработке нижней плоскости базируется по оси отверстия заготовки, например, с помощью двух конусов, один из которых неподвижен, а второй, перемещаясь, производит закрепление заготовки. Схема базирования выглядит следующим образом (см. рис. 5.10, б).

В этом случае размер  $V_\Delta$ , получаемый на первой операции, и становящийся размером  $A_2$  на операции № 100, получается как замыкающее звено размерной цепи, получающейся на первой операции. При этом звено  $V_1$  – настроечный размер при обработке технологической базы на первой операции; звено  $V_2$  – размер, принадлежащий заготовке, – расстояние от оси необработанного отверстия, используемого при базировании, до внутренней необработанной поверхности заготовки.

Погрешность размера  $V_\Delta$ , становящаяся погрешностью размера  $A_2$  на операции № 100, представляет собой

$$\omega_{A_2} = \omega_{V_\Delta} = \omega_{V_1} + \omega_{V_2},$$

где  $\omega_{V_1}$  и  $\omega_{V_2}$  – погрешности размеров  $V_1$  и  $V_2$ .

В этом случае погрешность размера  $A_\Delta$  (см. рис. 5.9) составит

$$\omega_{A_\Delta} = \omega_{A_1} + \omega_{A_2} = \omega_{A_1} + \omega_{V_1} + \omega_{V_2}.$$

*Вариант 3* (рис. 5.10, в). Заготовка на первой операции при обработке нижней базовой поверхности базируется на внутреннюю необработанную поверхность. В этом случае размер  $\Gamma_\Delta$ , получаемый на первой операции, и становящийся размером  $A_2$  на операции № 100, получается, как настроечный размер операции обработки плоскости на первой операции, и его погрешность составляет

$$\omega_{A_2} = \omega_{\Gamma_\Delta} = \omega_{\text{настройки}}.$$

В этом случае погрешность размера  $A_\Delta$  (см. рис. 5.9) составит

$$\omega_{A_\Delta} = \omega_{A_1} + \omega_{A_2} = \omega_{A_1} + \omega_{\Gamma_\Delta}.$$

Очевидно, что в этом случае предпочтительным становится третий вариант.

Представленные примеры позволяют сделать следующие выводы.

1. При выборе баз для первой операции может быть решена *одна единственная* задача, представляющаяся технологу главной.

2. В качестве технологических баз, выбираемых для первой операции, следует принимать поверхности, относительно которых определена задача, представляющаяся технологу главной.

### 5.1.3 Выбор измерительных баз

В общем случае измерительные базы выбираются таким образом, чтобы погрешность измерения была наименьшей.

Погрешность измерения будет тем меньше, чем короче измерительная размерная цепь.

Следовательно, *измерения должны вестись цепным методом.*

При измерении точности поворота одной поверхности относительно другой в качестве измерительной базы выбирают поверхность, относительно которой задан поворот контролируемой поверхности.

В любом случае в качестве измерительных баз следует стремиться *использовать конструкторские базы деталей.*

В практике имеются случаи, когда по ряду причин нельзя использовать конструкторские базы в качестве измерительных.

Эти случаи следующие:

1. Когда требуемая точность положения контролируемой поверхности относительно какой-либо из поверхностей выше, чем относительно технологической базы.

2. Когда расстояние между поверхностями или их относительный поворот не могут быть определены непосредственным измерением (измерительные базы – скрытые).

Второе положение иллюстрируется примером (рис. 5.11), когда в качестве измерительных баз здесь могут использоваться любые поверхности, даже свободные, но для этого эти поверхности должны быть обработаны и связаны точными размерами с технологическими базами (см. рис. 5.11).



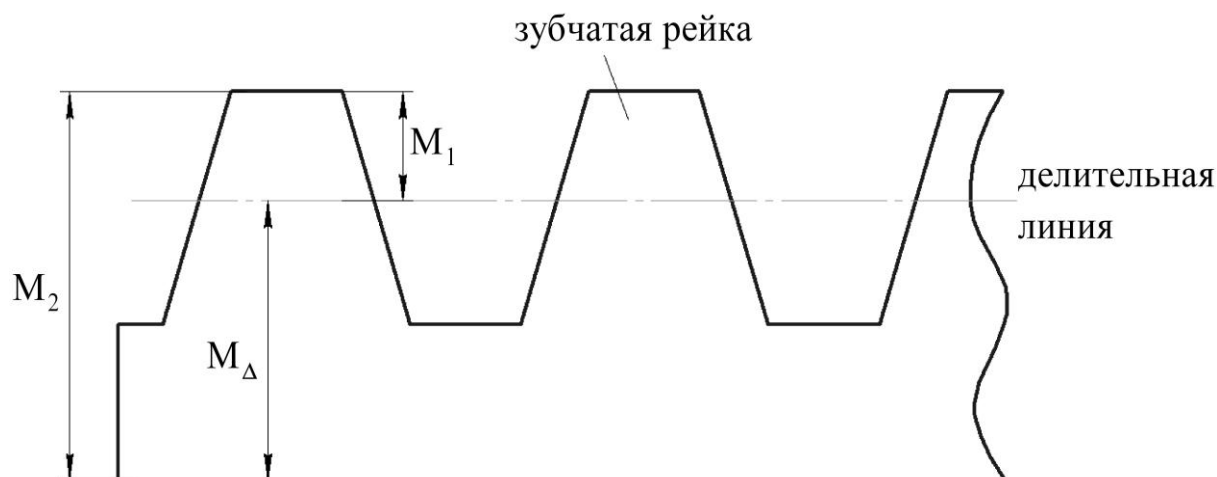


Рис. 5.11. Измерение размеров с помощью скрытых измерительных баз

Служебным назначением зубчатой рейки задан размер  $M_{\Delta}$ , который невозможно измерить, поскольку он является скрытым. В этом случае происходит организованная смена баз, при этом размер  $M_{\Delta}$  получается как замыкающее звено размерной цепи, включающей в себя размеры  $M_1$  и  $M_2$ .

Размер  $M_1$  определяется специальным устройством, «зубомером», определяющим высоту части зуба зацепления над делительной линией, размер  $M_2$  определяется простым измерением.

#### 5.1.4 Сокращение погрешностей установки за счет ряда дополнительных факторов

Поверхности технологических баз, особенно на первых операциях, отличаются значительной шероховатостью и отклонениями от правильных геометрических форм. Поэтому при базировании деталей существует некоторая неопределенность базирования.

Для того чтобы избежать этой неопределенности базирования применяются жесткие опоры: при этом опоры на всех приспособлениях, для всех операций стараются располагать по единому плану, чтобы базирование происходило по одним и тем же опорным точкам (рис. 5.12).



Рис. 5.12. Базирование заготовки на жесткие опоры

При установке нежестких заготовок, которые деформируются при обработке, наряду с основными опорами применяют опоры подводимые. Опоры подводятся после установки детали на постоянные опоры и фиксируются. Таким образом, подводимые опоры не базируют, а служат для увеличения жесткости технологической системы (рис. 5.13).

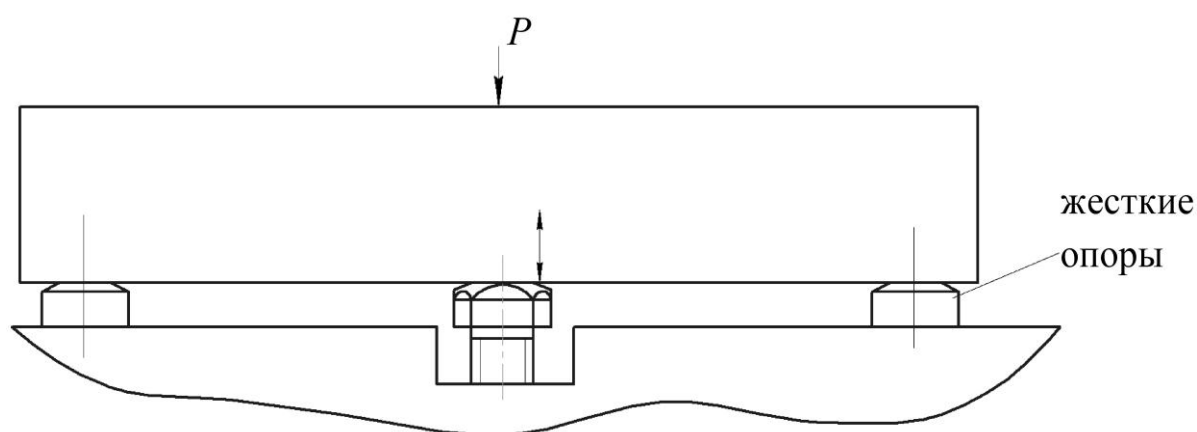


Рис. 5.13. Использование подводимых опор

Для уменьшения влияния точности поворота базовых поверхностей на погрешности установки необходимо опоры приспособления по возможности размещать по плоскостям симметрии поверхностей заготовки (рис. 5.14).

Для того чтобы получить большую определенность базирования, необходимо соответствующим образом задавать требования по точности формы базирующих поверхностей деталей (рис. 5.15):

а) необходимо задавать и получать при обработке отклонение от плоскостности поверхностей установочных баз в сторону вогнутости (рис. 5.15, а).

При этом достигается наибольшее расстояние между опорными точками базовых поверхностей, и, тем самым, снижается погрешность установки;

б) отклонение от плоскостности поверхностей направляющих баз должно быть:

– в сторону вогнутости в продольном направлении;

– в сторону выпуклости в поперечном направлении (рис. 5.15 б);

в) отклонение от плоскостности поверхностей опорных баз должно быть направлено в сторону выпуклости в обоих направлениях.

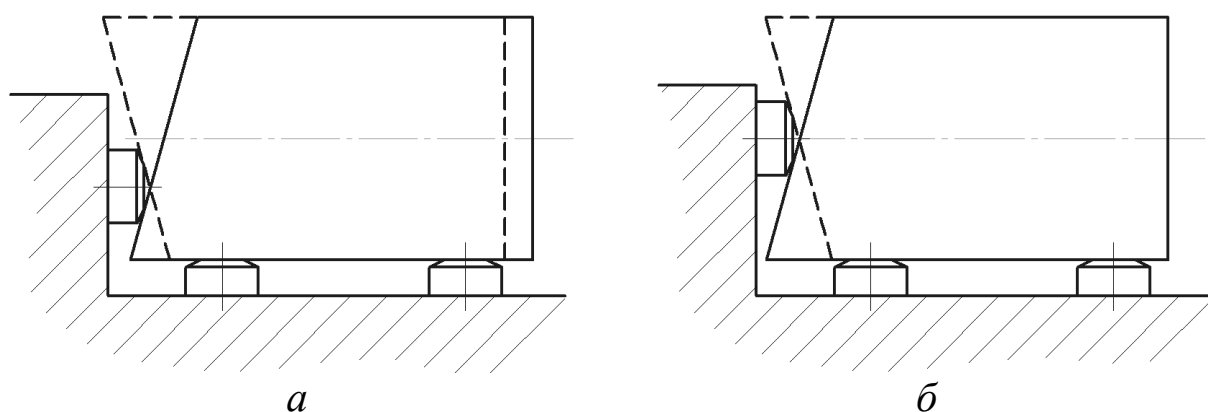


Рис. 5.14 Варианты размещения жестких опор

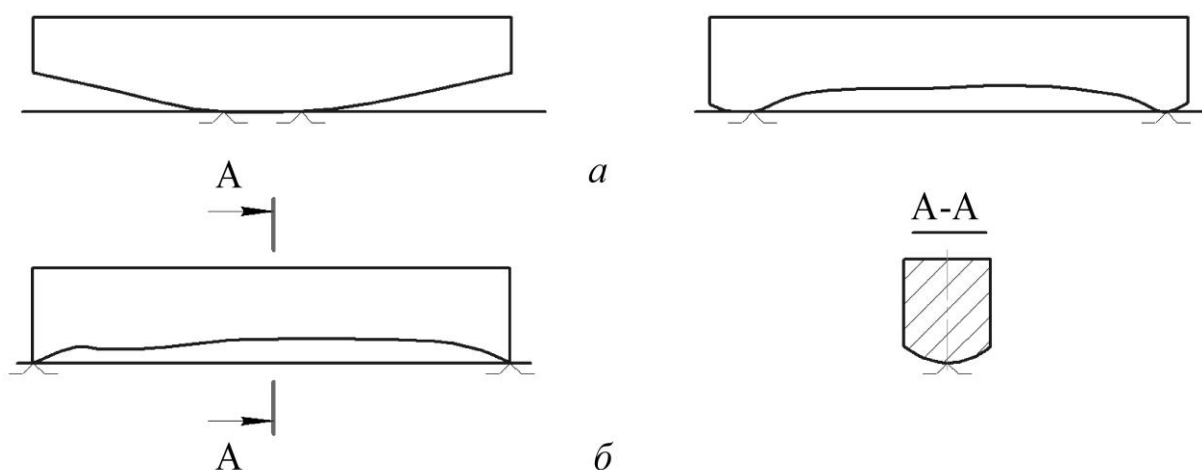


Рис. 5.15. Требования к точности формы базовых поверхностей

## 5.2 Сокращение погрешности статической настройки

В статическую настройку кинематических и размерных цепей технологической системы входит:

1) установка с требуемой точностью на станке приспособлений, служащих для базирования и закрепления обрабатываемых деталей и режущего инструмента;

2) перемещение и установка на расстоянии статической настройки с требуемой точностью режущих кромок инструмента относительно либо технологических баз детали, либо поверхности станка или приспособления, либо специально созданных измерительных баз;

3) проверка точности статической настройки после фиксации требуемого положения приспособления и инструмента.

Приспособления, как правило, устанавливаются на станках методом полной взаимозаменяемости. Существуют три типовые схемы установки – две схемы установки на столах станков и одна схема установки на шпинделях станков.

Первая схема – установка на прямоугольном столе станка (см. рис. 5.16). Приспособление ставят на стол станка установочной базой, следовательно, оно автоматически получит требуемую точность по трем координатам и лишится трех степеней свободы.

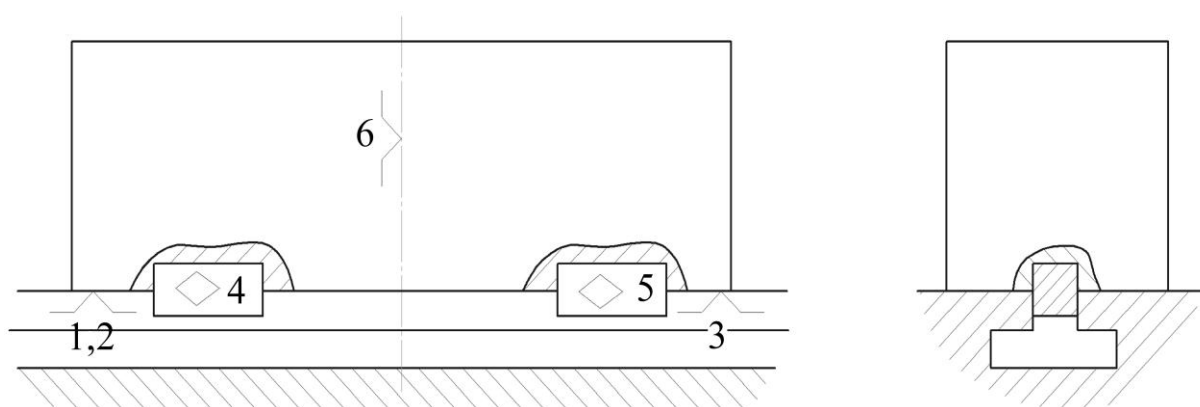


Рис. 5.16. Базирование приспособления на прямоугольном столе станка

В качестве направляющей базы используются Т-образные пазы стола станка, в которые помещаются две шпонки или два штифта (см. рис. 5.16).

Шпонки или штифты запрессовываются в корпус приспособления, а в пазы стола помещаются с зазором, вследствие чего возникает неопределенность базирования из-за перекоса шпонок

в зазорах. Для устранения неопределенности базирования используются односторонние шпонки (рис. 5.17).

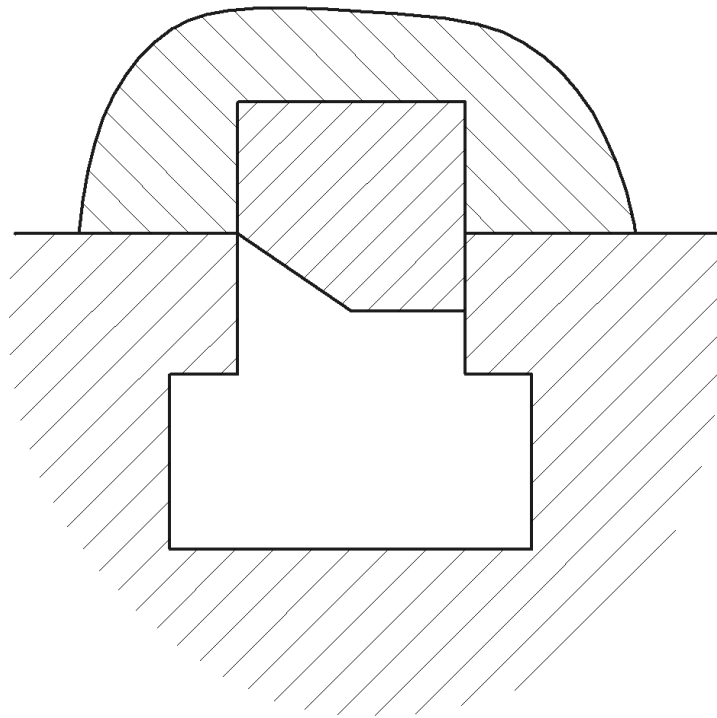


Рис. 5.17. Односторонняя шпонка (разрез А–А, рис. 5.16)

Вторая схема – установка на круглом столе станка (рис. 5.18). Круглые столы станков также имеют Т-образные пазы и точно обработанное центральное отверстие. Приспособление ставят на стол станка установочной базой, следовательно, оно автоматически получит требуемую точность по трем координатам и лишится трех степеней свободы. В центральное отверстие стола устанавливается оправка, на которую ставится приспособление. Оправка обеспечивает двойную опорную базу. В Т-образный паз помещается шпонка или штифт, запрессованный в нижней плоскости приспособления.

Третья схема – установка приспособления на шпинделе станка (рис. 5.19).

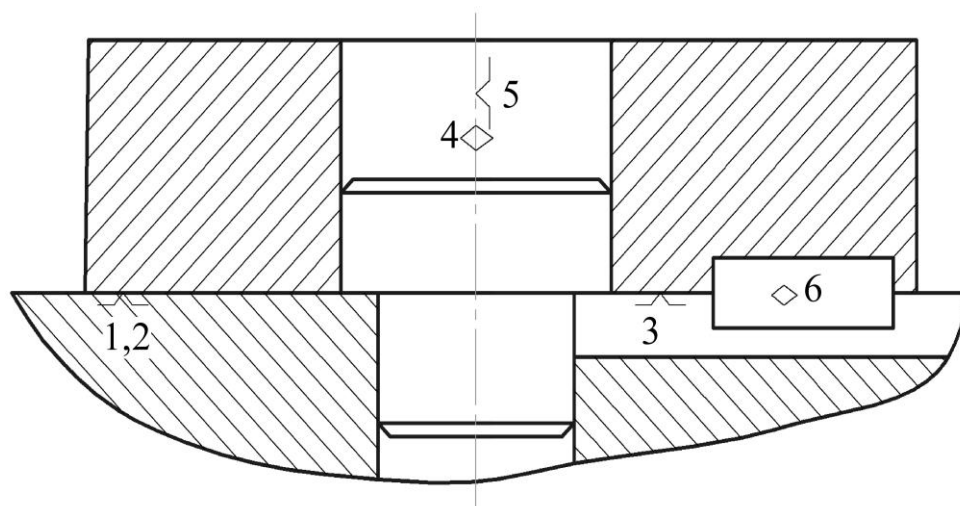


Рис. 5.18. Установка приспособления на круглом столе станка

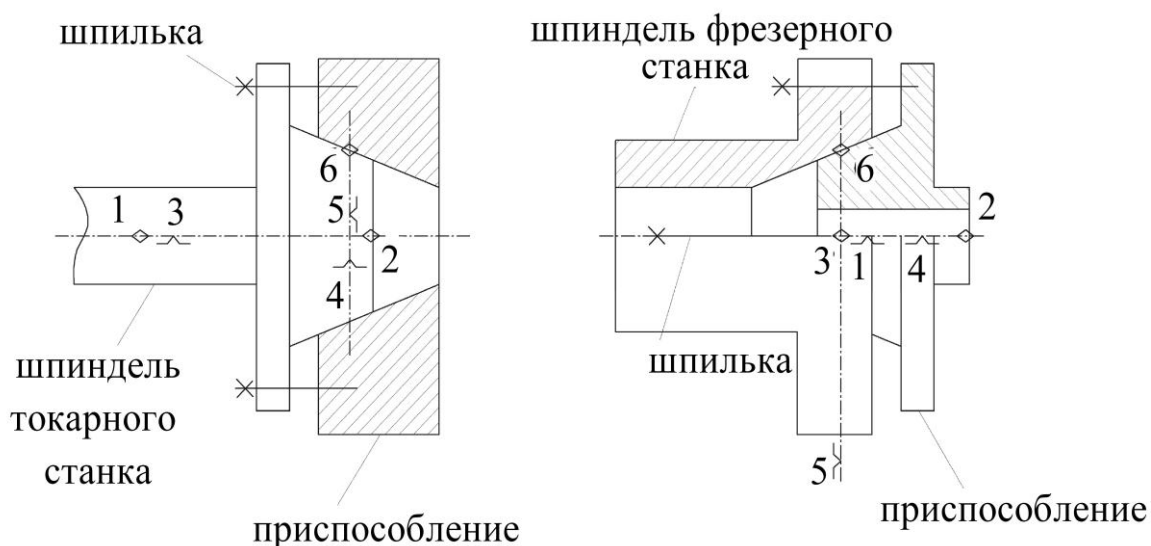


Рис. 5.19. Установка приспособления на шпинделе станка

В соответствии со стандартами на конце шпинделя любого станка имеется наружная или внутренняя коническая поверхность и фланец. Приспособление устанавливается на коническую поверхность, обеспечивающую двойную направляющую базу (опорные точки 1-4, рис. 5.19) и скрытую опорную базу (опорная точка 5). Приспособление закрепляется шпильками к фланцу или длинной шпилькой, пропущенной сквозь центральное отверстие шпинделя.

В конструкции приспособления также бывает полезно предусматривать поверхности для контроля его расположения.

Режущий инструмент также устанавливается на станках методом полной взаимозаменяемости. Любой, даже специальный инструмент, имеет стандартные посадочные поверхности, при этом используются три стандартные схемы базирования:

- базирование по наружным цилиндрическим или коническим поверхностям (концевой инструмент);
- базирование по внутренним цилиндрическим поверхностям (насадной инструмент);
- базирование в «координатный угол» по трем взаимноперпендикулярным поверхностям (резцы с призматическими державками на токарных станках).

Перемещение и установка режущих кромок инструмента на получаемый размер производится *методом регулирования*. При этом используются следующие способы, перечисляемые в соответствии с повышением точности настройки:

1) по лимбу станка: настройка осуществляется с помощью довольно грубого устройства станка, перемещающего режущую кромку инструмента относительно обрабатываемой поверхности;

2) по пробным деталям: настройка осуществляется по ранее обработанной детали. При этом ранее обработанная деталь устанавливается в технологическую систему, режущие кромки инструмента доводятся до касания с ранее обработанными поверхностями заготовки. Этот метод настройки не учитывает размера динамической настройки, т.е. упругого отжатия режущей кромки инструмента от обрабатываемой поверхности;

3) по эталону: настройка осуществляется по эталонной детали, размеры которой учитывают упругие отжатия режущего инструмента. При этом способе настройки используются щупы, поскольку эталон представляет собой закаленную шлифованную деталь, повреждение которой ведет к большим затратам;

4) настройка с помощью универсальных измерительных устройств: настройка ведется с помощью стандартных измерительных средств – штангенциркулей, микрометров, калибров, нутромеров, и т.д.;

5) настройка с помощью специальных встроенных измерительных устройств: настройка производится по специальным из-

мерительным приборам, электронным или оптическим, встроенным в конструкцию станка и предназначенным для определенных целей настройки. Это самый точный способ настройки станков.

### 5.2.1 Настройка и поднастройка технологической системы

Настройкой (наладкой) технологической системы называется процесс первоначального установления требуемой точности положения и относительного движения исполнительных поверхностей инструмента и оборудования или приспособления с целью получения требуемой точности обрабатываемых деталей [1].

При настройке технологической системы *методом регулирования* рассматривается одна из двух задач:

- настройка для обработки одной детали, используемая в мелкосерийном и единичном производстве. При этом каждая деталь обрабатывается после новой настройки;
- настройка для обработки партии деталей, применяемая в серийном и массовом производстве, когда детали обрабатываются последовательно на предварительно настроенном станке.

В обоих случаях основным методом настройки является *метод пробных проходов и промеров*. При настройке для обработки партии деталей могут быть использованы методы настройки по эталону или по ранее обработанной детали. При этом размер, к получению которого необходимо стремиться при настройке технологической системы, называется рабочим настроечным размером  $A_p$ . В качестве рабочего настроечного размера принимается среднее значение допустимых предельных размеров

$$A_p = A_{\text{ср}} = \frac{A^{\text{нб}} - A^{\text{нм}}}{2}.$$

Если настройка ведется на токарном станке, рабочий определяет величину упругого отжатия режущего инструмента  $A'_\delta$  и колебание этой величины  $\Delta_\delta$  на основании опыта и, опасаясь получить брак, подсознательно уменьшает величину  $A'_\delta$ .

Поэтому первичная настройка ведется по размеру статической настройки (рис. 5.20).



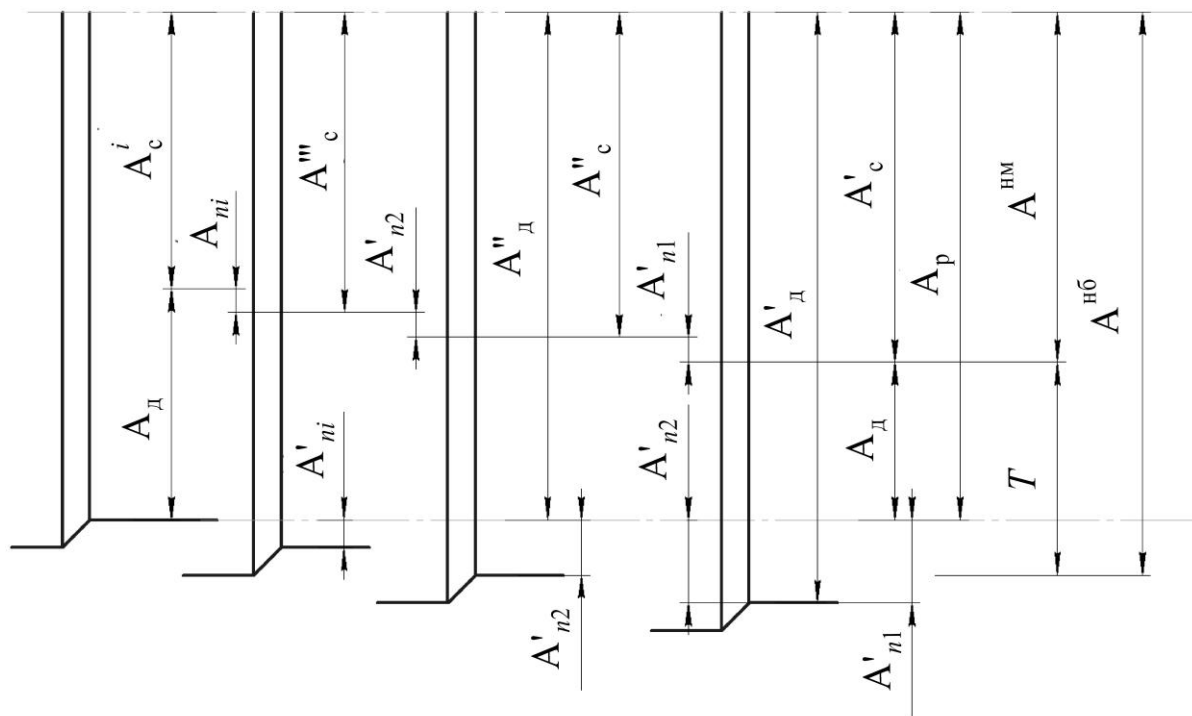


Рис. 5.20. Настройка станка методом пробных проходов и промеров

$$A'_c = \frac{A_p}{2} - A'_{n1}.$$

После этого производится обработка небольшого участка поверхности детали и замеряется величина полученного размера  $A'_\Delta$  (см. рис. 5.20). Она окажется больше  $A_p$  на величину  $A'_{n1}$ :

$$\frac{A'_\Delta}{2} - \frac{A_p}{2} = A'_{n1}.$$

Опасаясь получить брак, рабочий вносит поправку в первоначальный размер статической настройки  $A'_c$  на величину  $A_{n1}$ , несколько меньшую  $A'_{n1}$ , и получает размер

$$A''_c = A'_c - A_{n1},$$

на который производит повторную настройку.

После этого производится обработка нового участка поверхности *первоначального диаметра*, измерение полученной величины нового размера  $A''_\Delta$ , и, если  $A''_\Delta \neq A_p$ , определяется новая величина

$$A'_{n2} = \frac{A''_{\Delta}}{2} - \frac{A_p}{2},$$

вносится новая ( $A_{n2}$ ), несколько меньшая поправка в размер  $A''_c$ , и т.д. (см. рис. 5.20).

Процесс повторяется, пока не будет получен рабочий настроечный размер  $A_p$ .

Обработка крупных партий заготовок на настроенных станках сопровождается достаточно интенсивным износом режущего инструмента, оказывающим заметное влияние на точность размеров деталей после обработки. В этом случае возникает задача рационального расположения возможного поля рассеивания размеров деталей, порождаемого совокупным действием случайных факторов, в поле допуска на размер, с целью использования части этого поля для компенсации размерного износа режущего инструмента.

На рис. 5.21 приведена схема определения рабочего настроечного размера при настройке технологической системы для обработки партии деталей типа валов (рассмотрен вариант обеспечения заданной точности охватываемых размеров – наружных диаметров шеек вала).

Схема настройки технологической системы построена таким образом, что часть общего поля  $T$  допуска на размер используется для компенсации погрешности настройки  $T_H$ , часть  $\Delta_M$  предназначается для компенсации погрешности, вызванной действием случайных факторов, и часть  $b$  – для компенсации погрешности, вызываемой действием систематических факторов, например, износом режущего инструмента.

Для настройки технологической системы по рассматриваемой схеме требуется:

– вычислить минимальную необходимую по условиям выполнения данной операции величину допуска на погрешность настройки

$$T_H = 2,4\sqrt{\Delta_{\text{рег}}^2 + \Delta_{\text{изм}}^2},$$

где  $\Delta_{\text{рег}}$  – погрешность регулирования (установки) резца на размер;  $\Delta_{\text{изм}}$  – погрешность измерения наружных размеров;

– определить наибольшее предельное значение группового среднего размера

$$L_{\max}^{\text{гр.ср}} = L_{\min}^{\text{гр.ср}} + T_{\text{н}} ;$$

– определить величину рабочего настроечного размера

$$A_{\text{р}} = \frac{L_{\max}^{\text{гр.ср}} - L_{\min}^{\text{гр.ср}}}{2} ;$$

– определить часть допуска  $b$ , предназначенную для компенсации систематической переменной погрешности размера деталей, вызванной износом режущего инструмента:

$$b = T - \Delta_{\text{м}} \left( 1 + \frac{1}{\sqrt{m}} \right) - T_{\text{н}} ,$$

где  $T_{\text{н}}$  – допуск на размер детали.

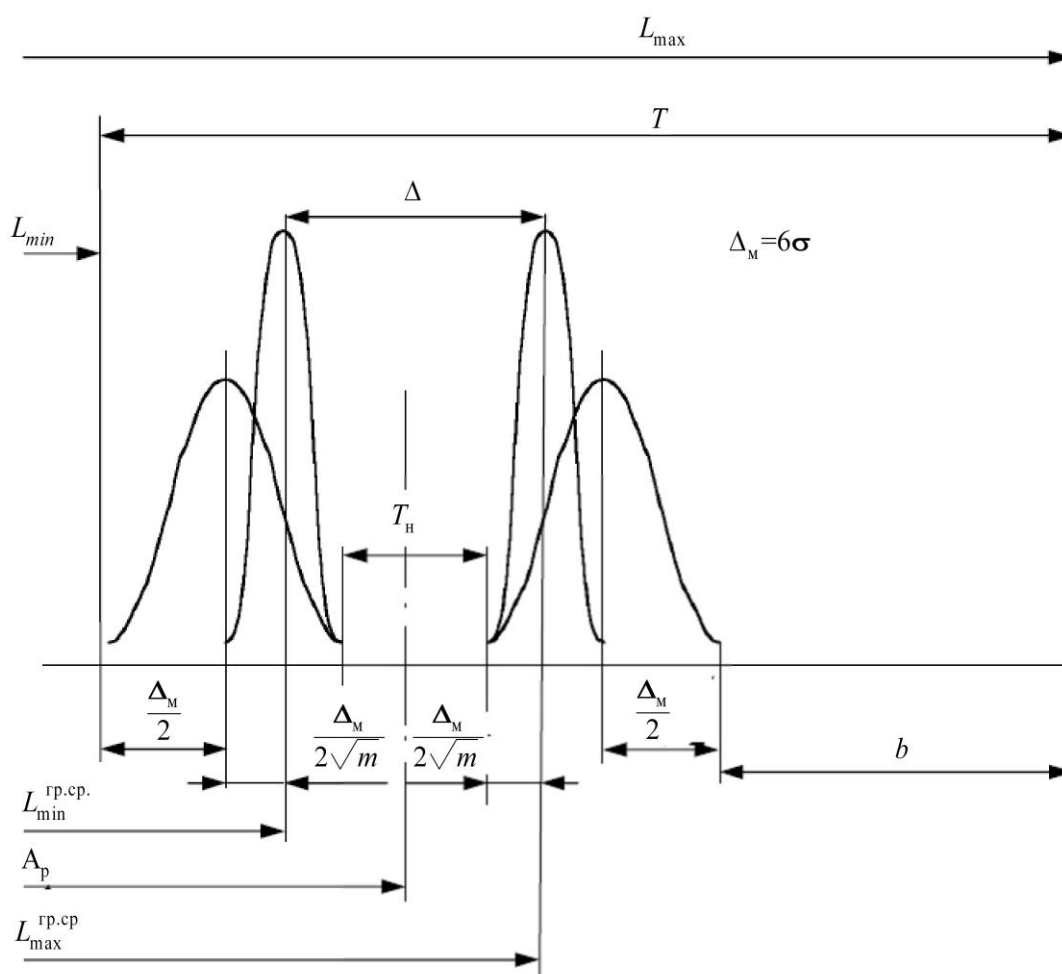


Рис. 5.21. Схема настройки технологической системы для обработки партии заготовок

Далее технологическая система настраивается на рабочий настроечный размер  $A_p$  и режим обработки, и обрабатывается группа из пяти пробных деталей ( $m = 5$ ). Получившиеся диаметры деталей замеряются, и определяется среднее арифметическое значение размеров

$$L^{\text{гр.ср}} = \frac{\sum_{m=1}^M L_m}{m},$$

где  $L_m$  – диаметры обработанных пробных деталей.

Если полученное значение  $L^{\text{гр.ср}}$  находится в интервале от  $L_{\text{max}}^{\text{гр.ср}}$  до  $L_{\text{min}}^{\text{гр.ср}}$ , технологическая система настроена с достаточной точностью, и можно начинать обработку партии заготовок. Если это условие не выполняется, следует определить поправку к рабочему настроечному размеру

$$\Delta_{\text{попр}} = \frac{L^{\text{гр.ср}} - A_p}{2}$$

и внести ее с получившимся знаком в рабочий настроечный размер технологической системы, как это делалось при настройке системы методом пробных проходов и промеров;

– произвести поднастройку технологической системы методом пробных проходов и промеров. Проверить выполнение последнего условия;

– определить теоретическую величину погрешности настройки технологической системы

$$\Delta_{\text{н}}^{\text{T}} = 2.4 \sqrt{\Delta_{\text{рег}}^2 + \Delta_{\text{изм}}^2 + \Delta_{\text{расч}}^2},$$

где  $\Delta_{\text{рег}}$  – погрешность регулирования (установки) резца на размер в поперечном направлении;  $\Delta_{\text{изм}}$  – погрешность измерения наружных размеров;  $\Delta_{\text{расч}}$  – погрешность метода расчета рабочего настроечного размера, определяемая из выражения

$$\Delta_{\text{расч}} = \frac{\Delta_{\text{м}}}{\sqrt{m}};$$

– оценить точность технологической системы. Для этого, в соответствии с требованиями ГОСТ 15467–70, рассчитать показатель уровня настройки по формуле

$$K_n = \frac{|L^{\text{гр.сп}} - A_p|}{T},$$

где  $T$  – допуск на размер детали, и сравнить его с предельно допустимым значением показателя уровня настройки, определяемым из выражения

$$K_{н.д} = \frac{T - 6\sigma}{2T}.$$

Здесь  $\sigma$  – среднеквадратическое отклонение размеров в пробной партии деталей, определяемое по известным формулам.

При выполнении условия  $K_n \leq K_{н.д}$  настройка технологической системы может быть признана удовлетворительной.

### 5.3 Сокращение погрешности динамической настройки технологической системы

С начала врезания между инструментом и деталью возникают силы резания, силы трения, внутренние силы сопротивления материала элементов технологической системы.

С начала действия сил резания и трения инструмент и деталь начинают перемещаться в пространстве за счет выбора зазоров в стыках деталей технологической системы, зоны контактных деформаций стыков и, наконец, собственных деформаций технологической системы. Эти перемещения происходят до тех пор, пока силы сопротивления технологической системы не уравновесят силы резания. Результат этих перемещений выражается в упругом отжатии режущих кромок инструмента от обрабатываемой поверхности в направлении получаемого размера. Величина этого упругого отжатия представляет размер динамической настройки технологической системы.

Если бы в продолжение всего времени обработки детали эта упругая деформация технологической системы сохранялась на одном уровне, то размер динамической настройки был бы постоянным, и его можно было скомпенсировать статической настройкой технологической системы. В результате непрерывного изменения сил резания в процессе обработки равновесное состояние технологической системы нарушается. При этом величина упругого отжатия режущих кромок инструмента относительно обра-

батываемой поверхности колеблется. Это колебание упругого отжатия режущих кромок инструмента относительно обрабатываемой поверхности представляет собой погрешность динамической настройки технологической системы.

Таким образом, технологическая система находится в неустойчивом равновесии: колеблющимся силам резания, стремящимся нарушить равновесие технологической системы, противодействуют силы упругого сопротивления элементов технологической системы.

*Основные факторы, влияющие на колебания сил резания:*

- колебания качества материала обрабатываемой заготовки;
- колебания толщины снимаемого слоя материала.

1. Колебания качества материала обрабатываемой заготовки.

До сих пор не установлена зависимость между качеством материала обрабатываемой заготовки и силами резания. При расчете сил резания качество материала детали учитывается с помощью коэффициента  $K_m$

$$P_z = C_p t^x S^y V^n K_m.$$

Коэффициент  $K_m$  колеблется от 0,15 для алюминиевых сплавов, до  $K_m = 1$  для горячекатаных сталей.

Даже в пределах одной марки материала  $K_m$  непостоянен, так как твердость материала заготовок меняется от заготовки к заготовке, и даже в пределах одной заготовки.

Уменьшить влияние колебания качества материала заготовки на колебание сил резания можно двумя способами:

- предварительно рассортировав заготовки по твердости на группы так, чтобы в каждой группе твердость заготовок была бы постоянной.

При переходе от обработки одной группы к обработке другой, вносится поправка в величину размера статической настройки станка  $A_c$ , чтобы компенсировать изменение размера динамической настройки  $A_d$ ;

- путем замера твердости каждой заготовки и внесения поправки в размер  $A_c$  перед обработкой каждой детали. Это очень сложный и трудоемкий путь, и на производстве для этого применяются автоматические устройства.

## 2. Колебания толщины снимаемого слоя материала.

Толщина снимаемого слоя материала под обработку определяется величиной припуска на обработку.

Глубина резания меняется от заготовки к заготовке, и в пределах одной заготовки при обработке одной поверхности.

Колебания толщины снимаемого слоя материала в пределах партии заготовок приводят к рассеиванию размеров.

Для уменьшения влияния колебания толщины снимаемого слоя материала на точность обработки стремятся сократить эти колебания величины припуска.

Используются следующие пути сокращения влияния колебаний припуска на точность обработки:

- назначение более жестких допусков на размеры заготовок: это не всегда возможно, так как с увеличением точности заготовок возрастает их стоимость;

- сортировка заготовок на группы по величине припуска. В каждую группу попадают заготовки в пределах одинакового припуска. При переходе от обработки одной группы заготовок к обработке другой, вносится корректировка в размер статической настройки  $A_c$  технологической системы;

- предварительное измерение припуска перед обработкой каждой детали с корректировкой размера статической настройки  $A_c$ . Этот способ сложен, так как требует применения специальных устройств.

Указанные факторы влияют на точность обработки заготовок посредством жесткости технологической системы.

### 5.3.1 Жесткость технологической системы

*Жесткость – это способность технологической системы сопротивляться появлению упругих деформаций под действием внешних усилий [1].*

Понятие жесткости станка введено в 1936 г. профессором К. В. Вотиновым.

Жесткость технологической системы измеряется отношением приращения нагрузки к получаемому при этом приращению упругого отжатия в направлении получаемого размера

$$j = \frac{\Delta P}{\Delta y},$$

где  $\Delta P$  – приращение нагрузки в технологической системе;  $\Delta y$  – приращение упругого отжатия технологической системы в направлении получаемого размера.

Различают *статическую* и *динамическую жесткость* технологической системы.

**Статическая жесткость** технологической системы – это жесткость неработающего станка. Технологическая система (станок – приспособление – инструмент – деталь) в статическом (неработающем) состоянии нагружается возрастающей статической нагрузкой (рис. 5.22).

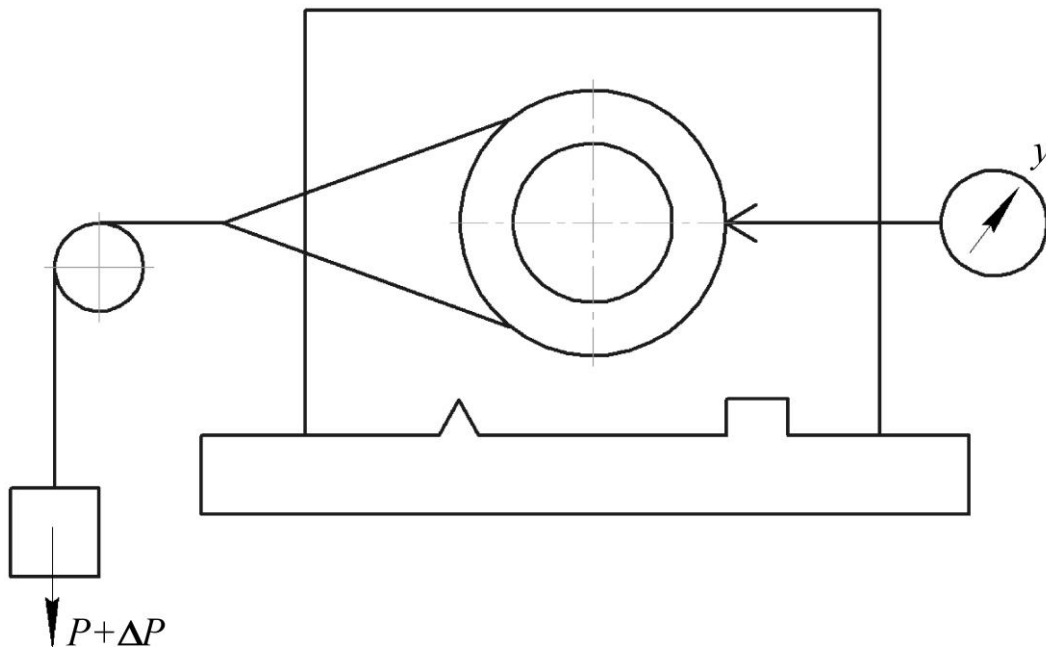


Рис. 5.22. Измерение статической жесткости технологической системы

С увеличением нагрузки  $\Delta P$  растет деформация технологической системы  $\Delta y$ . Для отслеживания закономерности строится график зависимости приращения упругой деформации  $\Delta y$  от приращения  $\Delta P$  – диаграмма жесткости (рис. 5.23).



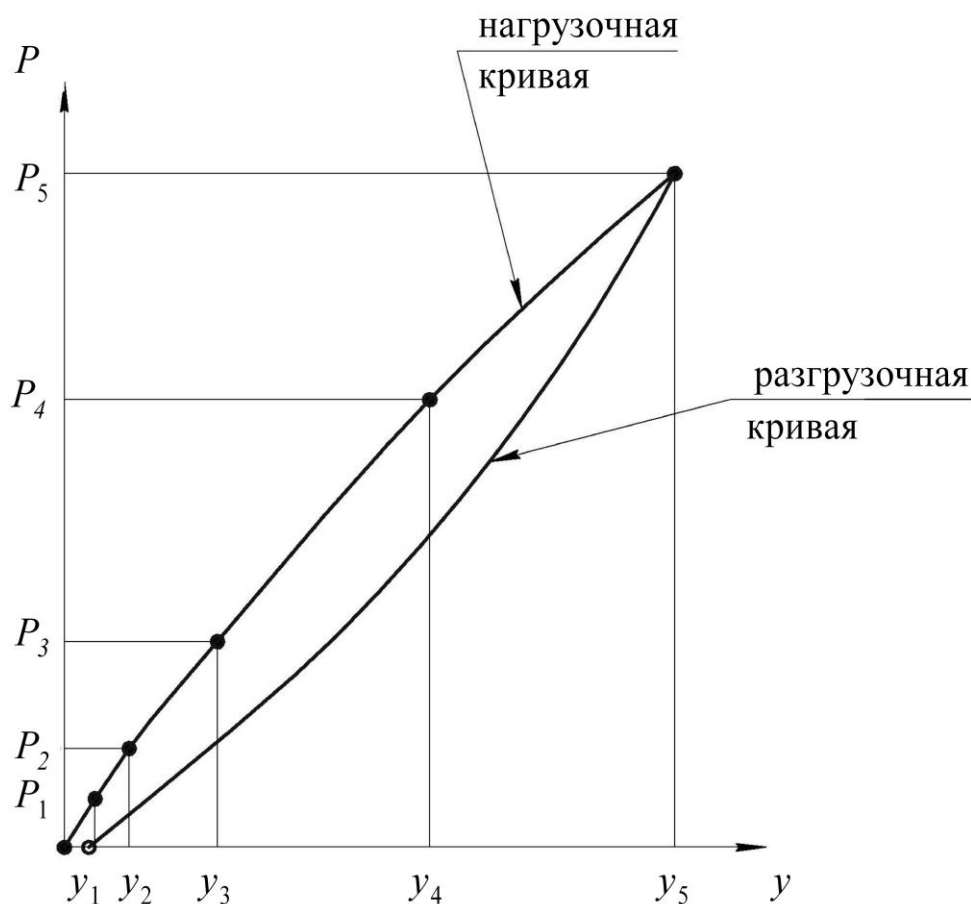


Рис 5.23 Диаграмма жесткости

При этом установлено, что график, полученный при увеличении нагрузки (нагрузочная кривая рис. 5.23) не совпадает с графиком, полученным при поэтапном разгрузении системы, т.е. при постепенном уменьшении нагрузки (разгрузочная кривая рис. 5.23).

Для объяснения этого явления рассмотрены процессы, происходящие при *первичном* нагружении *нового* узла технологической системы (рис. 5.24).

При возрастании нагрузки от нуля до  $P_1$  возникнет деформация технологической системы, равная устранению зазора в узле  $y_1$ .

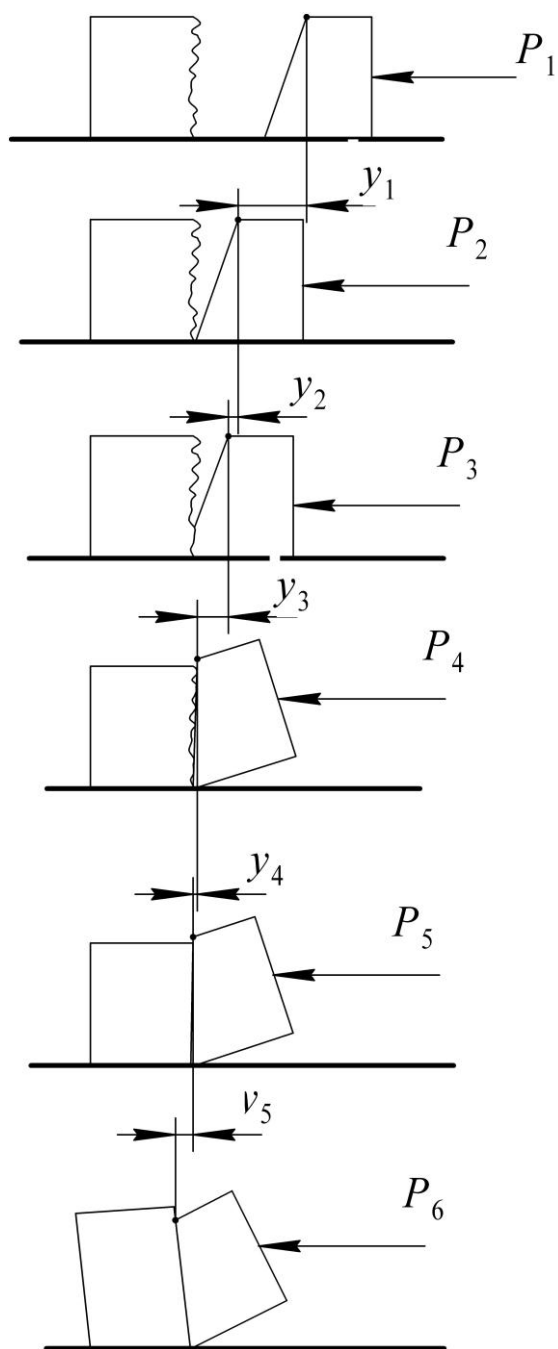


Рис. 5.24. Процессы, происходящие при нагружении узла технологической системы

При возрастании нагрузки от  $P_1$  до  $P_2$  произойдет контактная деформация в точке соприкосновения узлов 1 и 2, что приведет к возникновению контактной деформации  $y_2$ , изменяющей положение узлов.

При возрастании нагрузки от  $P_2$  до  $P_3$  произойдет поворот узла 2 относительно узла 1 – смена баз, при этом возникнет погрешность  $y_3$ , вызванная сменой баз сопряженных узлов.

Возрастание нагрузки от  $P_3$  до  $P_4$  приведет к контактной деформации по всей плоскости касания узлов 1 и 2 (см. рис. 5.24), что приведет к возникновению погрешности  $y_4$  контактной деформации узлов 1 и 2.

При дальнейшем возрастании нагрузки от  $P_4$  до  $P_5$  произойдет собственная упругая деформация узлов технологической системы  $y_5$ , определяемая зависимостями сопротивления материалов (прогиб).

При последовательном разгрузении технологической системы с нагрузки  $P_5$  до нагрузки  $P_1$  не происходит восстановления пластических контактных деформаций поверхностей узлов и деталей системы, не восстанавливаются первоначальные зазоры, поэтому разгрузочная кривая системы не совпадает с нагрузочной. При последующем ступенчатом снижении нагрузки ( $-\Delta P$ ) величина упругой деформации  $y$  снижается, но кривая разгрузки технологической системы  $\Delta y = f(\Delta P)$  не совпадает с кривой, полученной при нагрузке технологической системы.

Таким образом, кривая зависимости, полученной при нагружении технологической системы, не совпадает с кривой, полученной при разгрузке технологической системы (рис. 5.23). Эти кривые называются нагрузочной и разгрузочной.

*Площадь, образованная нагрузочной и разгрузочной кривыми жесткости, определяет работу, затрачиваемую на преодоление сил трения в узлах технологической системы и на контактные пластические деформации поверхностей стыка узлов технологической системы.*

**Динамическая жесткость** технологической системы – это жесткость работающего станка. Она отличается от статической жесткости технологической системы тем, что динамика работающего станка оказывает значительное влияние на результаты его работы. Это приводит к тому, что динамическая жесткость технологической системы в значительной степени отличается от величины статической жесткости.

Для определения динамической жесткости станков наиболее распространены два метода.

1. Метод эксцентричных колец (для исследования токарных станков). Метод заключается в следующем: для исследования жесткости используется жесткая оправка, на которой установлены эксцентричные кольца (рис. 5.25).

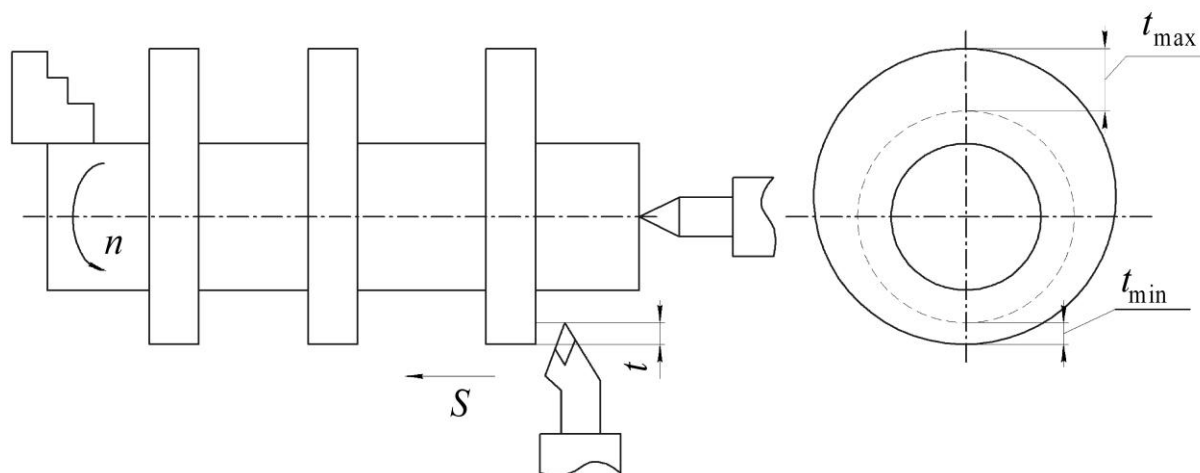


Рис. 5.25. Измерение жесткости методом эксцентричных колец

При определении жесткости устанавливаются частота вращения шпинделя  $n$  (скорость резания  $V$ ), подача  $S$ , глубина резания  $t$  (колеблющаяся от  $t_{\min}$  до  $t_{\max}$  при вращении оправки). При этом режиме резания производится обработка трех колец. При снятии максимального припуска  $t_{\max}$  сила резания имеет наибольшую величину и упругие отжатия режущего инструмента максимальны. При снятии минимального припуска  $t_{\min}$  упругие отжатия режущего инструмента имеют минимальную величину. Поэтому после обработки эксцентричных колец, ввиду ограниченной жесткости технологической системы, обработанные поверхности колец будут иметь радиальное биение  $\Delta u$ , соответствующее колебаниям величины упругого отжатия режущего инструмента из-за колебаний глубины резания (см. рис. 5.25). Определив колебания сил резания из формулы

$$\Delta P_z = C_p \Delta t^x S^y V^n K_M,$$

можно определить динамическую жесткость технологической системы

$$j = \frac{\Delta P}{\Delta y}.$$

Этот метод не обеспечивает достаточной точности, поскольку обработка эксцентричных колец не соответствует реальной технологии обработки валов на токарных станках.

2. Метод «обратного хода». Используется для любых типов станков. В примере для токарного станка метод выглядит следующим образом (рис. 5.26).

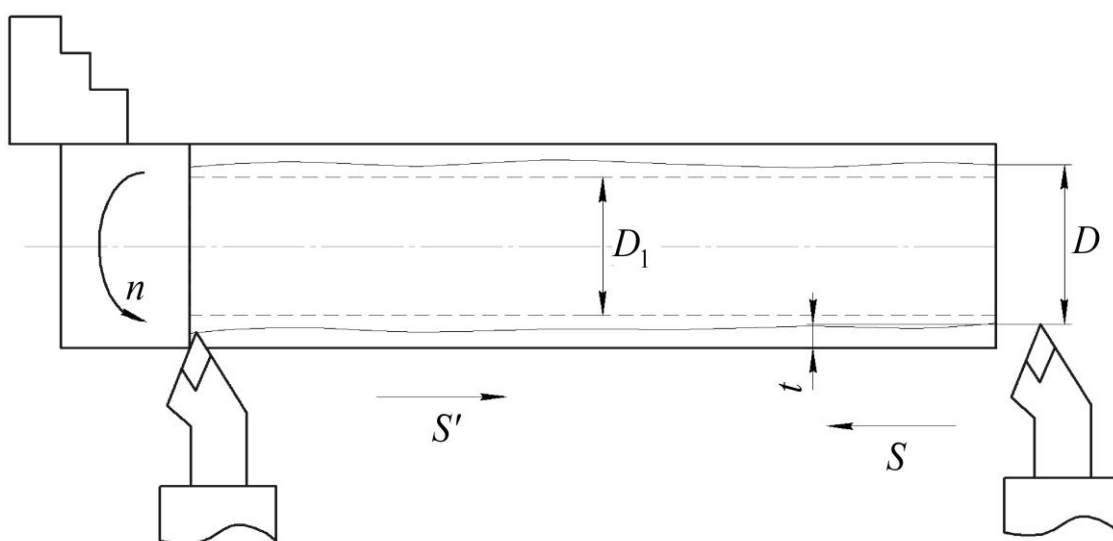


Рис. 5.26. Измерение жесткости методом обратного хода

При заданном режиме обработки (частота вращения шпинделя  $n$ , подача  $s$ , глубина резания  $t$ ) обрабатывается часть поверхности заготовки. Станок останавливается, и замеряется диаметр  $D$  после обработки. Не отводя резца, производят обратную подачу  $S'$ . При этом снимается тонкая стружка, толщина которой соответствует величине упругого отжатия резца при прямой подаче. После этого деталь получает размер  $D_1$ . Разность  $\frac{D - D_1}{2}$  представляет собой приращение упругой деформации технологической системы  $\Delta y$ . Считая, что сила резания при обратном ходе

режущего инструмента исчезающее мала, приращение силы резания  $\Delta P$  составит

$$\Delta P_z = C_p t^x S^y V^n K_M.$$

Многолетние исследования динамической жесткости технологических систем установили, что при определенных условиях упругого отжатия режущих кромок инструмента не происходит, т.е.  $\Delta y = 0$ , и величина жесткости  $j = \frac{\Delta P}{\Delta y}$  становится равной бес-

конечности. Иногда вместо отжатия режущего инструмента происходит его «втягивание» в заготовку, в результате упругое отжатие инструмента получается со знаком «-» и жесткость  $j$  получает отрицательный знак.

Для объяснения этого явления пользуются понятием эквивалентной силы, представляющей собой силу, момент которой равен сумме моментов всех действующих сил относительно мгновенного центра поворота технологической системы.

Применительно к суппорту токарного станка (рис. 5.27)

$$P_э = \frac{Pl_1 + Gm}{l_2},$$

где  $P$  – сила резания;  $G$  – вес суппорта;  $P_э$  – эквивалентная сила;  $l_1, m, l_2$  – плечи, отсчитываемые от мгновенного полюса поворота  $O$  по нормальям к соответствующим силам.

Под мгновенным полюсом поворота  $O$  понимается неподвижная точка, относительно которой осуществляется мгновенный поворот сборочной единицы или детали, рассматриваемой как абсолютно твердое тело.

Зная величину эквивалентной силы  $P_э$ , можно определить величину перемещения режущей кромки резца, вызываемой этой силой:

$$\Delta y = \frac{\Delta P_э}{j}.$$

По результатам рассмотрения раздела могут быть сделаны следующие выводы.

1. Жесткость технологической системы – это способность системы сопротивляться возникновению упругих деформаций под действием внешних сил.

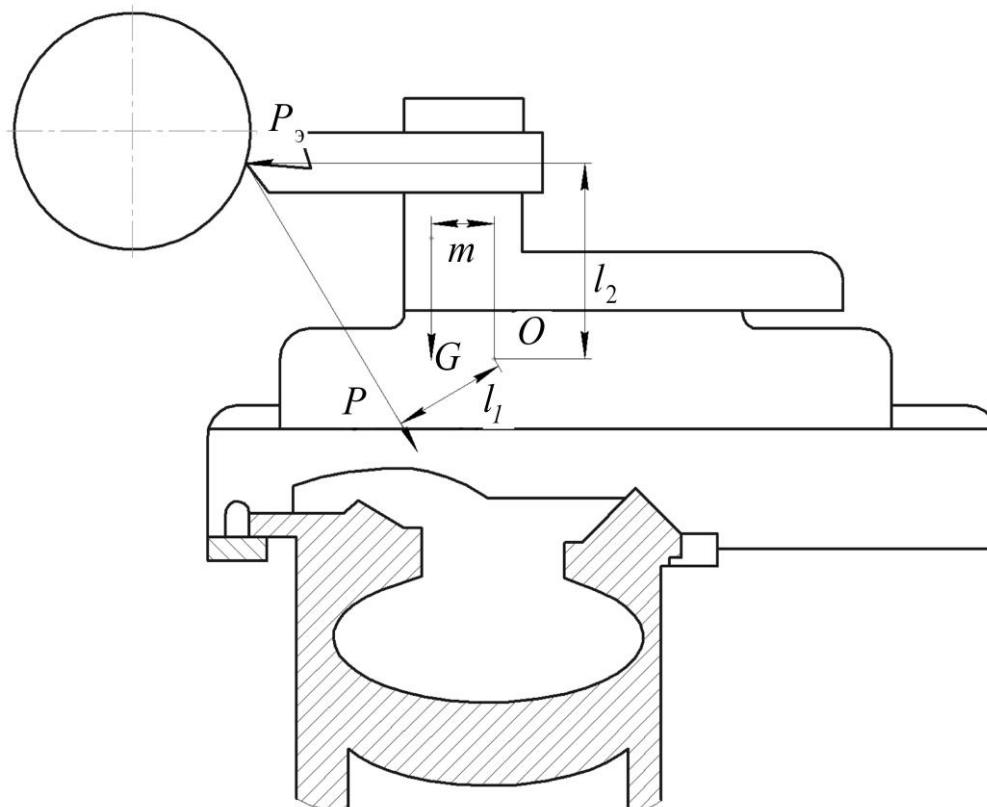


Рис. 5.27. Определение эквивалентной силы

2. Жесткость определяется как отношение

$$j = \frac{\Delta P_3}{\Delta y},$$

где  $\Delta P_3$  – приращение эквивалентной силы;  $\Delta y$  – приращение упругого перемещения в направлении действия эквивалентной силы.

3. Жесткость – это характеристика физического состояния технологической системы.

4. Жесткость – всегда положительная величина и не может быть ни бесконечно большой, ни отрицательной.

5. Жесткость – величина перемещения, зависящая от других характеристик состояния системы.

С учетом всего сказанного измерение жесткости должно производиться при фиксированных условиях.

Пути увеличения жесткости технологической системы.

1. Сокращение количества стыков деталей в узлах системы.
2. Обеспечение большей определенности базирования путем создания предварительного натяга.
3. Повышение контактной жесткости стыков деталей и узлов путем сокращения погрешностей формы сопрягаемых поверхностей.
4. Повышение собственной жесткости узлов и деталей технологической системы.
5. Стабилизация температуры узлов и деталей технологической системы.
6. Управление жесткостью технологической системы с помощью систем адаптивного управления.

### 5.3.2 Вибрации технологической системы

*Вибрации – это периодические колебания узлов и деталей технологической системы «станок – приспособление – инструмент – деталь» в процессе обработки.* Вибрации технологической системы приводят к возникновению волнистости на обрабатываемой поверхности, увеличению интенсивности износа режущего инструмента, повышенному износу и разрушению узлов станка и приспособления.–

Вибрации, возникающие в технологических системах, делят на два вида: вынужденные вибрации и автоколебания.

Причины возникновения вынужденных вибраций:

- динамическая неуравновешенность быстровращающихся деталей и узлов технологической системы;
- кинематические погрешности передач станка;
- колебания величины припуска на обработку;
- прерывистый характер процесса резания;
- колебания других работающих машин.

При устранении этих причин вынужденные вибрации прекращаются.

Автоколебания – незатухающие периодические колебания системы, поддерживаемые постоянно действующим источником



энергии. Автоколебания возникают при определенных условиях и продолжаются, пока эти условия не будут изменены.

Предложено несколько гипотез, объясняющих явление автоколебаний, однако окончательно физический механизм возникновения автоколебаний не установлен.

Достоверно установлено следующее.

1. Колеблются все элементы технологической системы: обрабатываемая заготовка, режущий инструмент, узлы станка и приспособления. Результат этих колебаний выражается в периодических перемещениях режущих кромок инструмента относительно обрабатываемой поверхности.

2. Движение режущей кромки в процессе вибраций представляет собой сумму двух колебательных движений, сдвинутых по фазе. В процессе работы система, будучи выведена какой-либо причиной из состояния равновесия, начинает совершать колебательные движения в двух направлениях (рис. 5.28, *а*) так, что результирующее относительное движение режущей кромки инструмента и обрабатываемой поверхности представляет собой замкнутую кривую, так называемую фигуру Лиссажу (чаще всего – эллипс, рис. 5.28, *б*). В точке 1 в результате нарушения равновесия системы режущую кромку начинает «затягивать» в материал детали. Увеличение сечения стружки приведет к увеличению силы резания  $P$  и упругой деформации режущего инструмента (точка 2, рис. 5.28, *б*). При этом возрастающие силы сопротивления технологической системы противодействуют этой деформации. В результате происходит «выталкивание» режущей кромки инструмента (точка 3, рис. 5.28, *б*), и с точки 4 начинается ее обратное перемещение, сопровождаемое уменьшением сечения снимаемой стружки. В результате при движении режущей кромки инструмента в направлении действия силы резания  $P$  (от точки 1 к точке 4, рис. 5.28, *б*) глубина резания, а, следовательно, и сила резания будут больше, чем при движении режущей кромки навстречу силе резания (от точек 4 и 5 к точке 1).

Таким образом, изменение силы резания сообщает дополнительный импульс энергии при каждом цикле колебаний. Это ведет к тому, что интенсивность колебаний нарастает до тех пор, пока не установится равновесие между энергией, питающей колебания и энергией, затрачиваемой на преодоление сил трения, инерции, тяжести деталей и узлов технологической системы.

Следовательно, источником энергии автоколебаний является процесс резания, то есть, в конечном счете – энергия привода станка. Площадь, ограниченная кривой 1-2-3-4-5 (рис. 5.28, б) представляет собой совершаемую за один цикл колебаний работу, затрачиваемую приводом станка на поддержание автоколебаний.

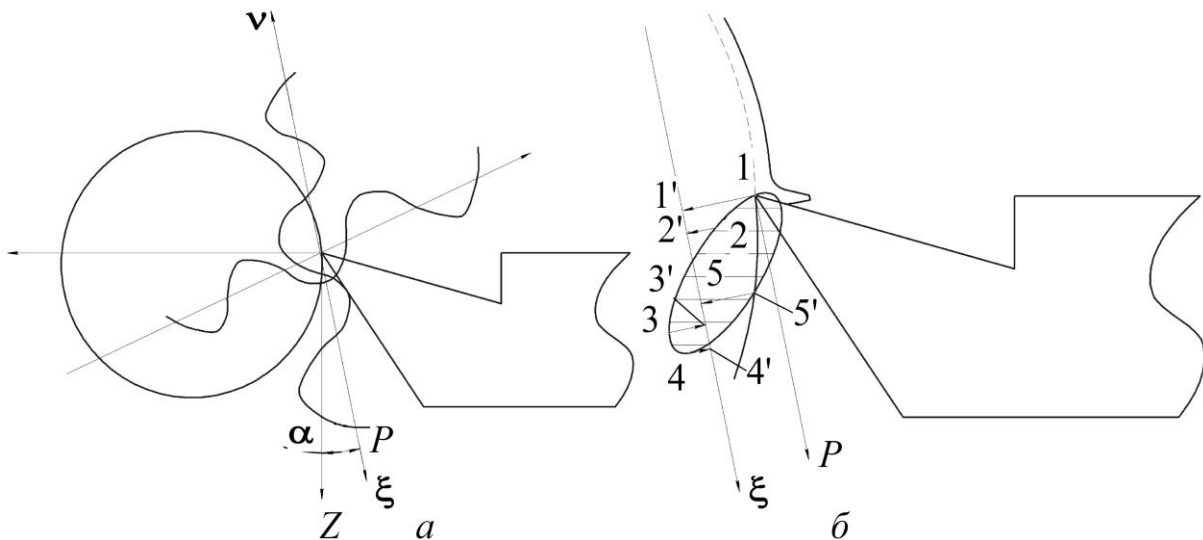


Рис. 5.28м Схема механизма возникновения автоколебаний

4. Одним из основных факторов, создающих условия для возникновения автоколебаний представляется явление резонанса. Сущность резонанса заключается в совпадении частот собственных колебаний отдельных взаимодействующих колебательных систем. Считается, что частота возникающих автоколебаний как правило близка к частоте одного из видов собственных колебаний станка, как сложной колебательной системы. Так, если частота вращения шпинделя станка совпадает с частотой изменения силы резания, амплитуда колебаний резко возрастает (рис. 5.29).

Поскольку станок представляет собой сложную колебательную систему, величина собственной частоты колебаний системы  $f_0$  может иметь несколько значений.

На основании проведенных исследований основными путями борьбы с вибрациями технологических систем являются:

– увеличение массы колеблющихся элементов технологической системы снижает частоту собственных колебаний системы;

- увеличение сил сопротивления возникновению колебаний
- сил трения за счет применения и подбора смазочно-охлаждающей жидкости;

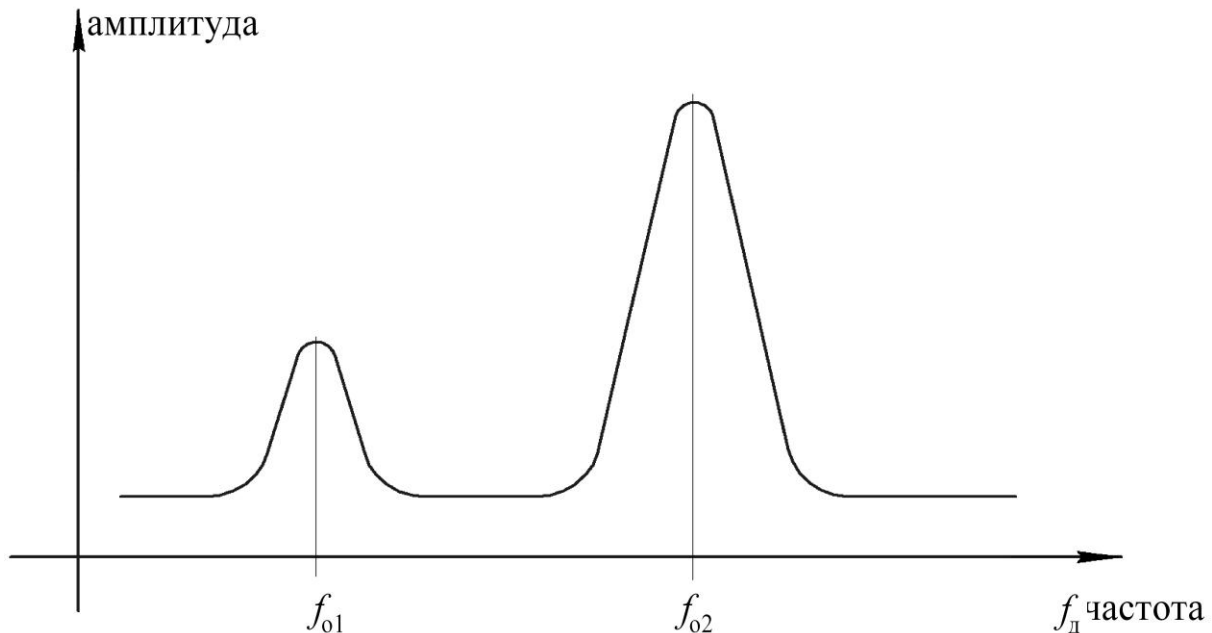


Рис. 5.29м Резонанс колебаний технологической системы

- увеличение жесткости элементов технологической системы за счет сокращения вылета инструмента, применения дополнительных опор для заготовки, увеличения жесткости приспособлений и станков;
- назначение виброгасящей геометрии режущего инструмента, создание виброгасящих фасок или лунок на передней грани инструмента, установка нескольких инструментов со взаимно уравновешивающимися силами резания;
- назначение режимов резания, безопасных по вибрациям;
- применение виброгасителей различных конструкций.

### 5.3.3 Размерный износ режущего инструмента

Размерный износ – это износ, определяемый по нормали к обрабатываемой поверхности (рис. 5.30).

Износ по задней грани изменяет положение режущей кромки инструмента относительно первоначального положения, достигнутого при настройке станка. При износе резца по задней

границы на величину  $h$ , режущая кромка сместится на величину  $U$ , и на эту величину увеличится диаметр заготовки. Величина  $U$  представляет собой размерный износ режущего инструмента – износ в направлении получаемого размера.

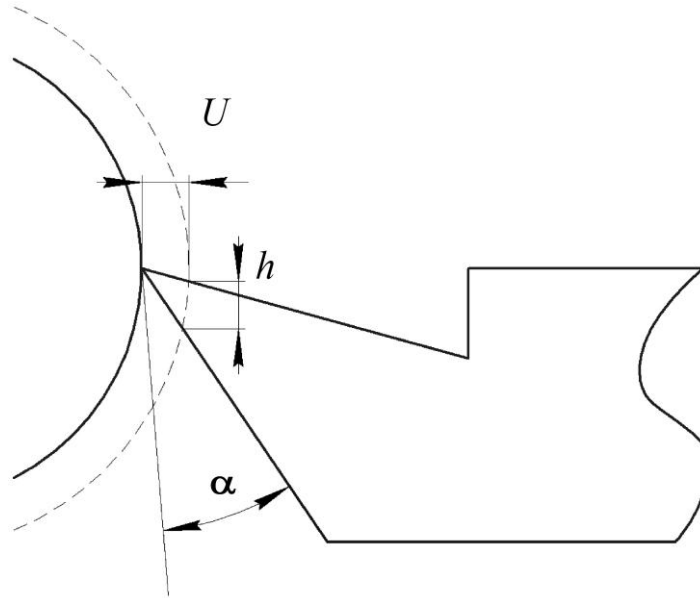


Рис. 5.30. Размерный износ режущего инструмента

При большинстве методов обработки

$$U = h \cdot \operatorname{tg} \alpha,$$

где  $\alpha$  – задний угол режущей кромки.

Размерный износ подчиняется той же закономерности, что и износ по заданной грани (рис. 5.31).

При изучении размерного износа пользуются характеристикой, которая называется интенсивностью износа:

$$U_0 = \operatorname{tg} \beta = \frac{U_{\text{н}} - U_2}{l_2 - l_1},$$

где  $U_{\text{н}}$  – величина начального износа (приработки);  $U_2$  – величина износа инструмента в конце линейного участка износа (нормального износа);  $l_1$  – длина пути резания при начальном износе;  $l_2$  – длина пути резания в конце линейного участка износа.

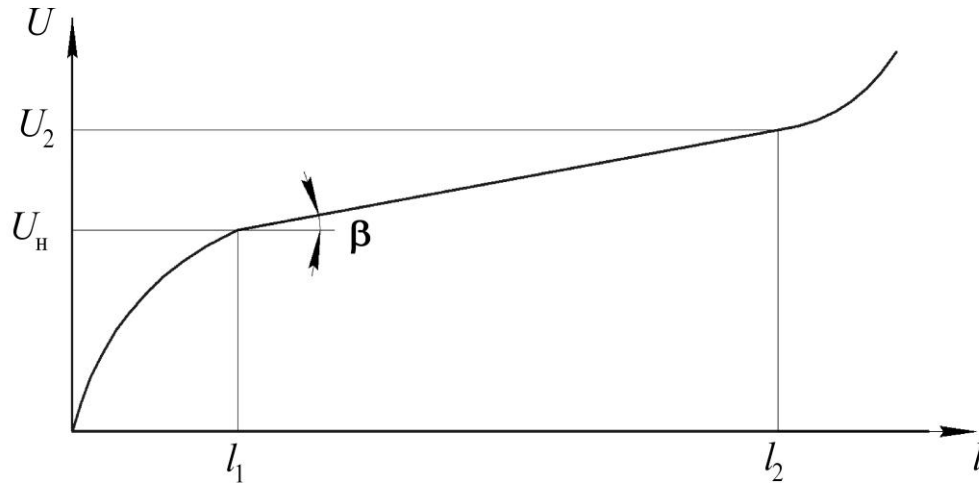


Рис. 5.31. Износ режущего инструмента

Зная величины  $U_{\text{н}}$  и  $U_0$ , можно определить величину размерного износа на любом участке пути резания  $l$ :

$$\Delta U = U_{\text{н}} + U_0 \cdot l.$$

Необходимо отметить, что износ режущего инструмента — это случайный (стохастический) процесс. Каждая режущая пластина имеет свои значения  $U_{\text{н}}$  и  $U_0$ , которые могут колебаться в широком диапазоне в пределах одной партии режущих пластин.

Факторы, определяющие износ режущего инструмента:

- твердость материала заготовки;
- вид и качество материала режущего инструмента;
- геометрия заточки режущего инструмента;
- режимы резания;
- вид и характер применения смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ);
- наличие вибраций: стойкость инструмента снижается прямо пропорционально квадрату амплитуды колебаний.

Устранить износ режущего инструмента невозможно: можно уменьшить его влияние на точность обработки деталей.

Пути сокращения влияния размерного износа режущего инструмента на точность обработки:

- повышение стабильности качества режущих пластин;
- доводка режущих кромок инструмента алмазным шлифованием для сокращения величины начального износа  $U_{\text{н}}$ ;

- стабилизация сил резания;
- устранение вибраций в технологической системе;
- подбор оптимальных по износостойкости инструмента режимов резания;
- своевременная замена инструмента для его переточки;
- правильный подбор и применение смазочно-охлаждающей жидкости;
- компенсация размерного износа инструмента путем поднастройки размерных цепей технологической системы;
- правильная установка и закрепление инструмента.

#### 5.3.4 Температурные деформации технологической системы

Причиной возникновения тепловых деформаций технологической системы «станок – приспособление – инструмент – деталь» является неравномерный нагрев ее элементов. При этом меняется относительное положение элементов технологической системы и в результате изменяется первоначальный уровень настройки.

Наибольшее влияние на точность обработки оказывают температурные деформации трех элементов технологической системы:

- станка;
- заготовки;
- инструмента.

*Тепловые деформации станков* вызваны наличием следующих источников тепла:

- электро- и гидроприводы станков;
- процессы трения в узлах станков;
- процессы резания;
- источники тепла в окружающей среде.

Эти, как правило, локальные источники нагревают отдельные узлы станков до различных температур, что приводит к тепловым деформациям станков. В результате меняется относительное положение баз и исполнительных поверхностей станка. Установлено, что увеличение температуры любого узла станка, как и вызванное этим увеличение линейных размеров, носит экспоненциальный характер (рис. 5.32, а). Снижение температуры узлов станка после его выключения также подчиняется экспонен-

циальному закону. При этом температура  $\Theta_0$  – это температура теплового равновесия технологической системы с окружающей средой: количество тепла, получаемого системой, равно количеству тепла, рассеиваемому системой в окружающую среду. Если станок периодически включается и выключается, характер изменения температуры его узлов приобретает вид, показанный на рис. 5.32, б.

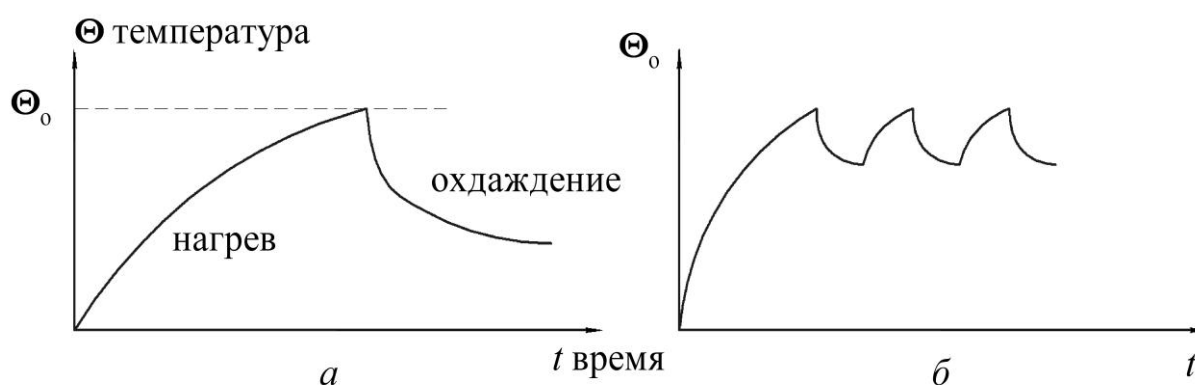


Рис. 5.32. Изменения температуры технологической системы во времени

Следовательно, для сокращения колебаний температуры узлов станка и, соответственно, сокращения тепловых деформаций простои станков должны быть сведены до минимума.

Тепловые деформации станков влияют:

- на точность размеров деталей после обработки;
- на точность относительных поворотов поверхностей деталей после обработки;
- значительно реже – на точность формы поверхностей деталей после обработки.

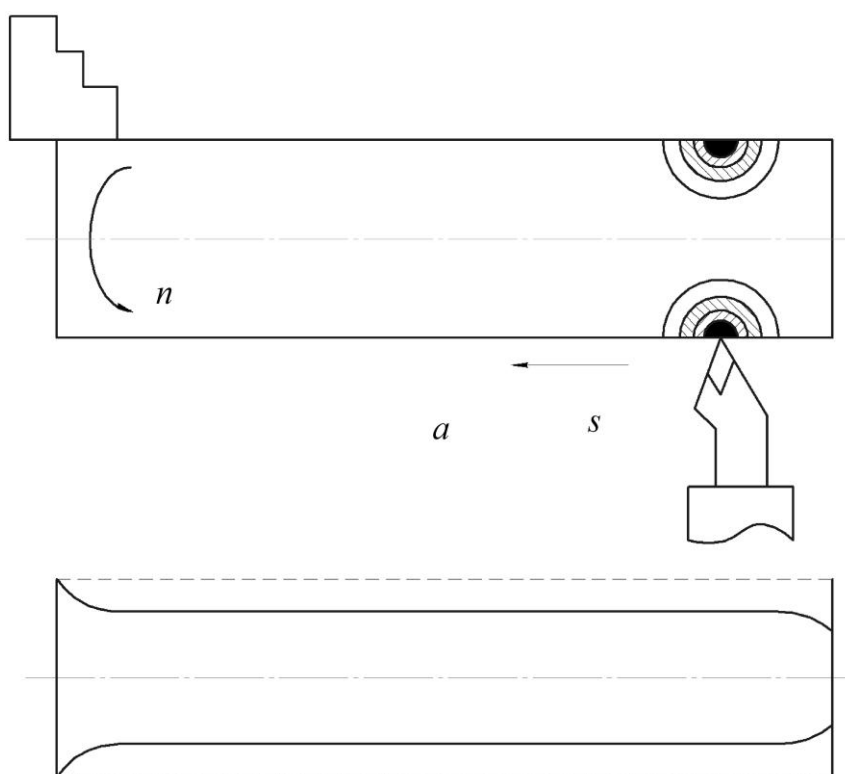
Методы борьбы с тепловыми деформациями станков:

- поддержание колебаний температуры воздуха в помещении в узких пределах ( $20 \pm 0,5$ ) °С (термоконстантные цеха);
- встраивание в станки систем охлаждения или подогрева отдельных узлов;
- сокращение простоев станков до минимальной величины;
- встраивание в станки автоподналадчиков, компенсирующих тепловые деформации станков.

*Тепловые деформации заготовок* определяются двумя факторами:

– неравномерным нагревом заготовок, приходящих с предыдущей операции. Заготовки могут быть неравномерно нагреты предыдущей обработкой. После обработки таких заготовок и их охлаждения возникнут неравномерные усадки, которые приведут к увеличению рассеивания размеров;

– процессом резания. Так, при точении заготовка нагревается кольцевым источником тепла, перемещающимся вдоль заготовки (рис. 5.33, *a*).



- б

Рис. 5.33. Погрешности формы, возникающие при тепловой деформации заготовки

В процессе обработки наблюдаются три периода распространения тепла:

– в начале обработки холодная заготовка начинает нагреваться кольцевым источником тепла: тепловое расширение заготовки невелико;



– в процессе обработки заготовки устанавливается тепловое равновесие с окружающей средой – деформация заготовки имеет постоянную величину;

– из-за отражения тепловой волны от торца заготовки и накопления теплоты ввиду сокращения площади рассеивания тепла происходит повышение температуры остающегося участка, что ведет к нарастанию тепловой деформации.

В результате после охлаждения деталь примет форму, представленную на рис. 5.33, б.

Тепловые деформации заготовки оказывают влияние на все показатели точности, причем трудно учитываемое влияние.

Пути уменьшения тепловых деформаций заготовок:

– применение смазочно-охлаждающих жидкостей;

– повышение скорости резания – позволит большую часть выделяемого при резании тепла отвести в стружку;

– чередование операций с большим и меньшим нагревом заготовки;

– применение транспортеров и конвейеров, не допускающих скопления деталей на их отдельных участках;

– выдержка заготовок на транспортирующих устройствах для выравнивания температуры перед следующей операцией обработки;

– при проектировании технологических процессов предусматривается чередование ответственных операций с менее ответственными, операций с большим разогревом – с более легкими операциями.

*Тепловые деформации режущего инструмента.*

Инструмент при обработке подвержен наибольшему нагреву по сравнению с другими элементами технологической системы, следовательно, тепловые деформации инструмента оказывают наибольшее влияние на точность обработки.

При нагреве инструмент удлиняется, и положение режущей кромки меняется по сравнению с холодным резцом. Сложность учета этой деформации заключается в том, что при нагреве удлинение инструмента происходит нелинейно, в соответствии с экспоненциальным законом (см. рис. 5.32).

Тепловые деформации инструмента влияют на точность размеров деталей и, для крупных деталей, на точность их формы.

Пути сокращения влияния тепловых деформаций режущего инструмента на точность обработки:

- сокращение перерывов в процессе резания;
- повышение ритмичности процесса резания;
- увеличение скорости резания;
- применение смазочно-охлаждающей жидкости.

### 5.3.5 Деформации деталей из-за перераспределения остаточных напряжений

Остаточные напряжения – это напряжения, которые остаются в деталях после снятия внешних нагрузок. Остаточные напряжения могут присутствовать во всем объеме детали, либо только в некоторых ее частях. Обычно остаточные напряжения в деталях уравниваются и ничем себя не проявляют.

Со временем происходит перераспределение остаточных напряжений, которое приводит к деформации детали.

Основная причина возникновения остаточных напряжений – неравномерное остывание детали после нагрева во время обработки, либо во время получения заготовки. Так, наибольшие остаточные напряжения возникают при литье, ковке, штамповке, сварке, термообработке, резании металлов. Основные перераспределения остаточных напряжений происходят в сроки до 70 дней.

Для того чтобы избежать деформаций деталей, стараются сократить процесс перераспределения остаточных напряжений.

Основные мероприятия, позволяющие сократить влияние остаточных напряжений на точность деталей:

- правильная разработка конструктивных форм заготовок, обеспечивающая равномерное остывание всех ее частей;
- правильное ведение технологических процессов изготовления отливок, поковок, сварных заготовок и особенно процесса их охлаждения;
- естественное и искусственное старение заготовок;
- обязательное выделение черновой обработки заготовки в отдельные операции.

Наиболее эффективны процессы естественного и искусственного старения заготовок.

При естественном старении заготовки помещаются под открытым небом и подвергаются воздействию погодных условий в течение длительного времени.

Искусственное старение ускоряет процесс перераспределения остаточных напряжений.

Один из видов искусственного старения – термическое старение. При этом заготовка нагревается до  $500^{\circ}\text{C}$ , выдерживается в течение пяти часов, и медленно охлаждается до  $200^{\circ}\text{C}$  в течение суток.

## 6 УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

### 6.1 Поверхностный слой детали

В процессе изготовления и эксплуатации детали на ее поверхности возникают неровности, в поверхностном слое изменяется структура металла, фазовый и химический состав, в детали возникают остаточные напряжения [3-9].

*Поверхностный слой детали* – наружный слой детали с измененной структурой, фазовым и химическим составом по сравнению с основным металлом, из которого изготовлена деталь. Внешняя поверхность этого слоя граничит с окружающей средой или с сопряженной деталью.

Существуют различные схематические представления зон поверхностного слоя, одна из которых показана на рис. 6.1; в ней различают 5 основных зон [3].

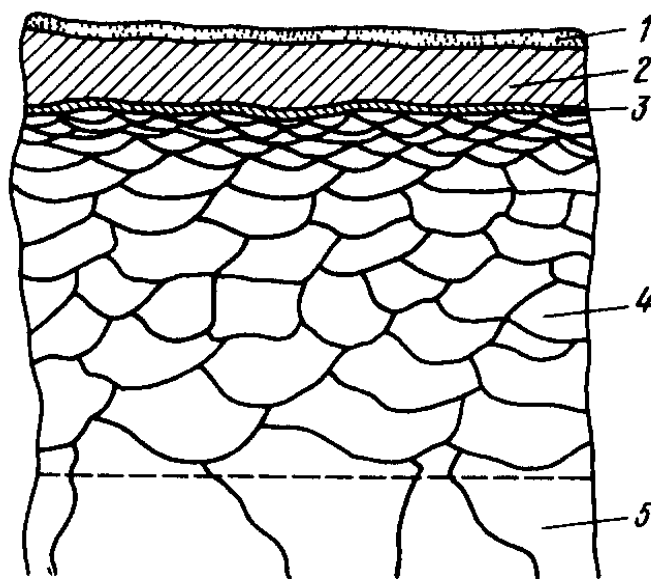


Рис. 6.1. Схема поверхностного слоя детали

Зона 1 (толщиной 1...100 нм) – это зона адсорбированных из окружающей среды молекул и атомов органических и неорганических веществ.

По мнению авторов [4], верхний поверхностный слой состоит из нескольких слоев атомов, положение которых существенно

отличается от положения атомов, находящихся в глубинных слоях. Атомы глубинных слоев со всех сторон окружены другими атомами и находятся в состоянии устойчивого равновесия. Атомы, лежащие на поверхности, испытывают воздействие только нижележащих атомов; они находятся в неустойчивом, неуравновешенном состоянии, а граничный слой обладает запасом свободной поверхностной энергии.

Часть поверхностной энергии (потенциальная энергия) затрачивается на деформирование кристаллической решетки, вторая часть (кинетическая энергия) – на колебательный процесс атомов граничного слоя.

Повышенная энергетическая активность поверхностного слоя непосредственно связана с его служебными свойствами, поскольку из-за такой активности поверхность адсорбирует элементы окружающей среды и, прежде всего, пары воды, газы, жиры и др. Это обстоятельство влияет на контакт детали с другими поверхностями.

Адсорбированные пары (жидкость) проникают в тонкие трещины, которые всегда имеются на поверхности (рис. 6.2). Жидкость создает в капиллярах высокое давление, в результате чего нарушается прочность поверхностного слоя.

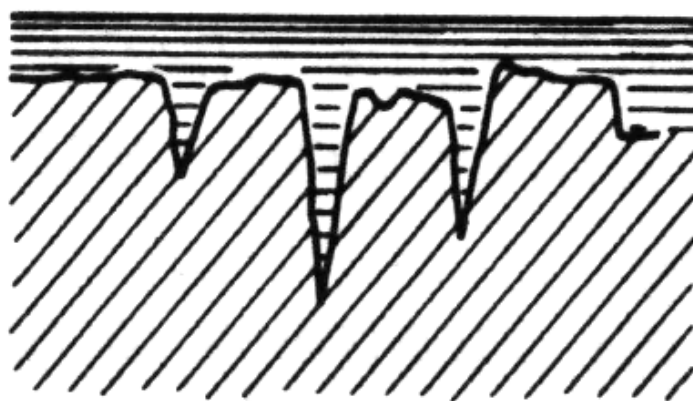


Рис. 6.2. Схема расположения трещин в тонком поверхностном слое

На основе тонких физических исследований установлено, что из-за несовершенства граничного слоя в связи с точечными

дефектами на поверхности детали имеются миллионы участков аналогичных показанным на схеме (рис. 6.3) [5]. Поверхность гетерогенна в геометрическом и химическом отношении, что непосредственно связывается с характером явлений в ходе контактирования деталей со средой.

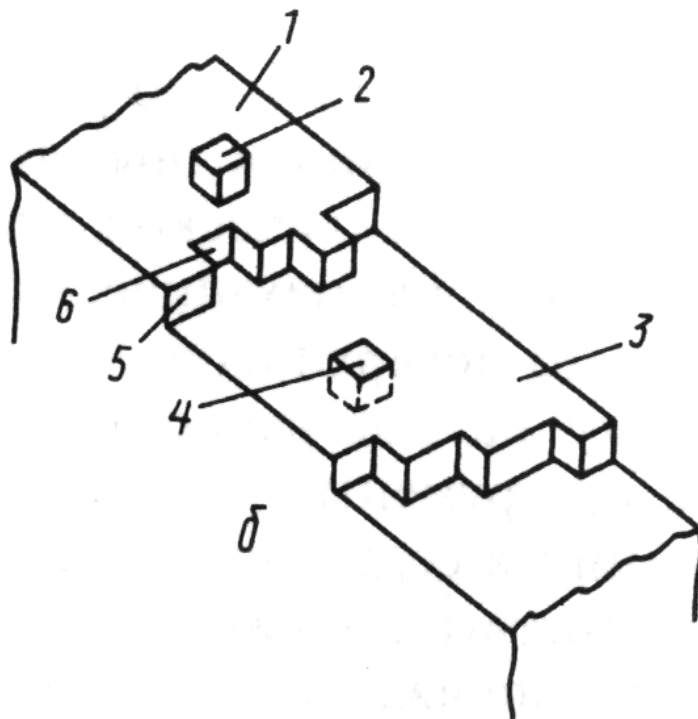


Рис. 6.3. Модель строения поверхности:

1 – терраса; 2 – адсорбированный атом; 3 – то же на ступеньке; 4 – вакансия на террасе; 5 – одноатомная ступенька; 6 – петля

Зона 2 (толщиной 1...10 мкм) представляет зону продуктов химического взаимодействия металла с окружающей средой (обычно оксидов).

В граничной зоне 3 (толщиной в несколько межатомных расстояний; атомное расстояние составляет порядка 0,1 нм) металл имеет иную, чем в объеме, кристаллическую и электронную структуру. Наряду с основным металлом в этой зоне имеется большое количество дислокаций, различных примесей, концентрирующихся по границам зерен.

Наличие примесей в виде инородных атомов вызывает искажение кристаллической решетки, что влияет на механические, физические, магнитные и другие свойства поверхностей деталей.

В зоне 4 (толщиной от 10 мкм до 1...5 мм и более) металл имеет измененную структуру, фазовый и химический состав, возникшие при изготовлении детали и изменяющиеся в процессе эксплуатации. Частицы материала этой зоны сильно деформированы вследствие технологического воздействия инструмента на поверхность в ходе предшествующих операций.

В зоне 5 располагается основной металл, имеющий структурный состав и, соответственно, свойства, заданные при его производстве.

В результате воздействия различных режущих и деформирующих инструментов, вследствие пластической деформации, фазовых превращений и других явлений в поверхностном слое возникают напряжения, отличающиеся от напряжений в сердцевине материала. Подобные напряжения уравниваются в пределах определенных областей – атомов, зерен и всей детали. Указанные напряжения оказывают существенное влияние на эксплуатационные свойства деталей.

Поверхностный слой детали ввиду контактирования с поверхностными слоями других деталей и взаимодействия с внешней средой претерпевает существенные изменения в процессе эксплуатации.

Металл поверхностного слоя испытывает различные виды внешних воздействий: трение, приводящее к износу и потере работоспособности детали; усталостные напряжения, приводящие к накоплению повреждений, зарождению и развитию микро- и макротрещин и, в итоге, к разрушению детали; коррозионные воздействия, приводящие к уменьшению толщин сечений, потере массы и снижению основных прочностных свойств и др.

Вследствие износа выходит из строя 80 % машин. Потеря транспортной машиной массой 3...5 т в ходе эксплуатации 3...4 кг, а подшипником качения массой 10...14 кг – 20...30 г приводит к полной утрате работоспособности. Износ деталей машин приводит к снижению их точности, увеличению динамических нагрузок, уменьшению коэффициента полезного действия, снижению прочности [4].

В свою очередь, износ в значительной степени зависит от шероховатости поверхностей сопряжения и других свойств по-

верхностного слоя, которые формируются в ходе технологического процесса изготовления деталей машин.

Многочисленными исследованиями установлено, что усталостные разрушения также начинают зарождаться на поверхности. Явления усталости также связаны с шероховатостью поверхности и физико-механическими характеристиками поверхностного слоя. Например, риски технологической шероховатости с ослабленными физико-механическими характеристиками являются концентраторами напряжений и очагами разрушения.

В настоящее время установлено, что характеристики поверхностных слоев непосредственно связаны с контактной жесткостью, виброустойчивостью, коррозионной стойкостью, прочностью сопряжений, плотностью соединений, теплоотражением, прочностью сцепления с покрытием, сопротивлением обтеканию газами и другими эксплуатационными параметрами.

На обеспечение заданных свойств поверхностных слоев в процессе изготовления и ремонта затрачивают десятки миллиардов долларов в год.

Толщина и состояние указанных зон поверхностного слоя (ПС) могут изменяться в зависимости от состава материала, методов обработки и условий эксплуатации. Оценка этого состояния осуществляется методами химического, физического или механического анализа.

Многообразие состояний поверхностного слоя и методов его оценки не позволяет выделить единственный показатель, определяющий это состояние или, как принято говорить, *качество поверхностного слоя*. Поэтому в научной и инженерной практике качество поверхностного слоя оценивается набором единичных или комплексных параметров, выбор которых зависит от метода оценки.

Для характеристики и оценки неровностей поверхности, структурно-фазового и химического состава ПС деталей после различных методов и режимов обработки используются:

- 1) геометрические параметры неровности поверхности;
- 2) параметры физического состояния;
- 3) параметры химического состава;
- 4) параметры механического состояния.



## 6.2 Основные параметры качества поверхностного слоя деталей машин

*Геометрические параметры неровности поверхности* оцениваются параметрами шероховатости, волнистости и регулярных микрорельефов.

Геометрические отклонения реальной поверхности условно делят на макрогеометрические (отклонения геометрической формы и волнистость) и микрогеометрические (шероховатость).

Макрогеометрические отклонения от правильной геометрической формы (собственно погрешности формы) – это единичные, на протяжении всей рассматриваемой поверхности, отклонения от идеальной геометрической формы поверхности: овальность, конусность, бочкообразность (рис. 6.4). Они характеризуются значительным отношением протяженности поверхности  $L_1$  к отклонению от правильной ее формы  $h_1$ :  $L_1/h_1 > 1000$ . Высота отклонения может составлять 0,1–1500 мкм на всей его длине.

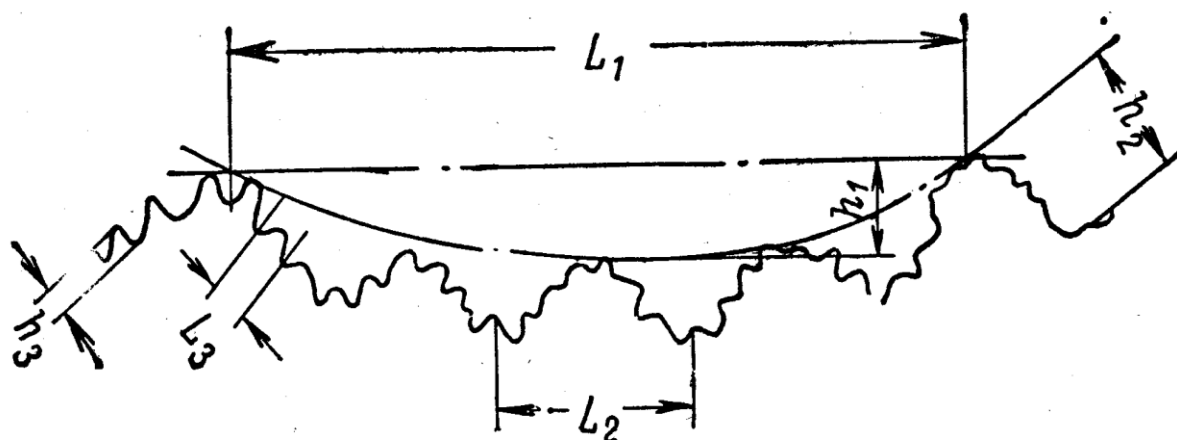


Рис. 6.4. Макро- и микрогеометрические отклонения реальной поверхности

Волнистость поверхности – это многократно и закономерно повторяющиеся, более или менее одинаковые по размерам отклонения, носящие характер волн, при отношении их шага  $L_2$  к высоте  $h_2$  наиболее часто в пределах  $50 \leq L_2/h_2 \leq 1000$ . Высота неровностей может составлять от 1 до 150 мкм.

Причиной появления волнистости поверхности являются вибрации обрабатываемой детали, станка и инструмента, неравномерность протекания процесса резания вследствие различных причин (неравномерности подачи и пр.), а также другие факторы. Наиболее отчетливо волнистость проявляется при точении, фрезеровании, строгании, протягивании и шлифовании.

Микрогеометрические отклонения или микронеровности, характеризующиеся малым отношением их шага  $L_3$  к высоте  $h_3$  в пределах  $L_3/h_3 < 50$ , называются шероховатостью поверхности. Различают поперечную и продольную шероховатости (рис. 6.5). Первая характеризуется микронеровностями в направлении движения подачи АС, вторая – в направлении главного движения АВ.

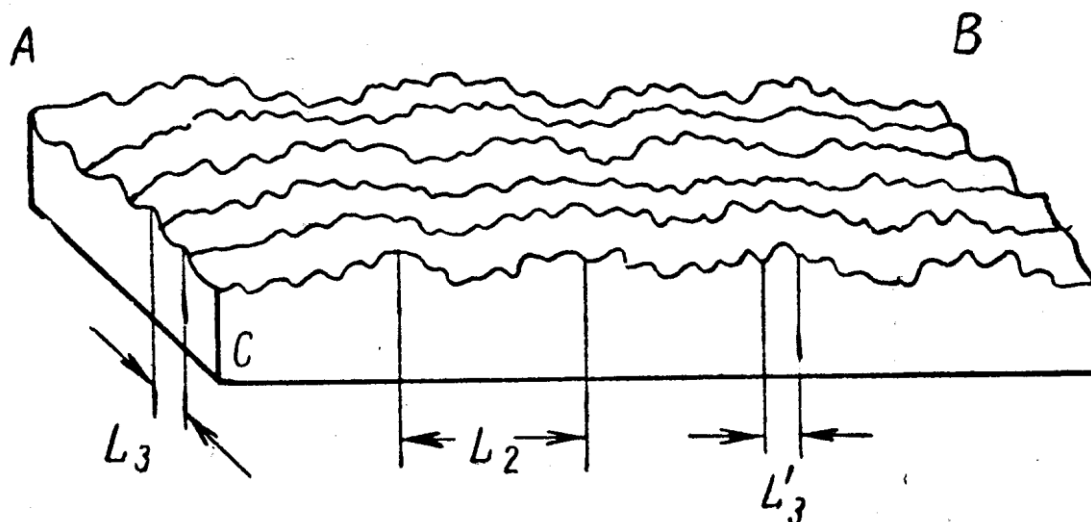


Рис. 6.5. Поперечная и продольная шероховатости:  
 $L_2$  – шаг волн;  $L_3$  – шаг поперечных микронеровностей;  
 $L'_3$  – шаг продольных микронеровностей

Характер и расположение микронеровностей по отношению к направлению подачи зависят главным образом от способа обработки. Так, при грубом точении и строгании наибольшая шероховатость наблюдается в направлении движения подачи, т.е. для этих способов обработки, как и для большинства других, характерна поперечная шероховатость. Оценку шероховатости («чистоты») обработки поверхности детали производят в направлении

наибольшей шероховатости поверхности, т.е., как правило, в направлении подачи инструмента.

*Шероховатость поверхности* характеризуется рядом стандартизованных параметров в соответствии с ГОСТ 2789–73 [6]:

- средним арифметическим отклонением профиля  $Ra$ , мкм;
- высотой неровностей профиля по десяти точкам  $Rz$ , мкм;
- наибольшей высотой неровностей профиля  $R_{\max}$ , мкм;
- средним шагом неровностей профиля  $Sm$ , мм;
- средним шагом неровностей профиля по вершинам  $S$ , мм;
- относительной опорной длиной профиля  $t_p$ , %.

При необходимости используют также и нестандартизованные параметры по ГОСТ 25142–82 и др. [7].

*Волнистость поверхности* в России не стандартизована, и для ее оценки используют параметры, аналогичные параметрам шероховатости, или параметры, установленные отраслевыми нормами или зарубежными стандартами.

Волнистость поверхности оценивается:

- высотой волнистости  $W_z$ , мкм;
- максимальной высотой волнистости  $W_{\max}$ , мкм;
- средним шагом волнистости  $Sm_w$  и др.

*Регулярные микрорельефы (РМР)* – это неровности, которые в отличие от шероховатости одинаковы по форме, размерам и взаиморасположению. В соответствии с ГОСТ 24773–81 поверхности бывают с полностью или частичным регулярным микрорельефом.

*Физическое состояние* поверхностного слоя деталей в технологии механической обработки наиболее часто характеризуется параметрами структуры и фазового состава.

*Структура* – это характеристика металла, зависящая от методов изучения его строения. В связи с этим выделяют следующие типы структур: кристаллическая структура; субструктура; микроструктура; макроструктура.

Кристаллическая структура и субструктура могут быть определены методами прямого или косвенного анализа.

Микроструктура – это структура, определяемая с помощью металлографических микроскопов: наличие, количество и форма структурных составляющих сплава.

Макроструктура – это структура, которая определяется невооруженным глазом или при небольших увеличениях. С помощью макроанализа можно определить трещины, неметаллические включения, примеси и др.

Основные параметры структуры:

- размер зерен  $l_z$ , мкм;
- форма и распределение зерен;
- ориентация решетки монокристаллического материала;
- текстура поликристаллического материала;
- плотность дислокаций  $\rho_d$ , см<sup>3</sup>;
- концентрация вакансий  $C_v$ ;
- размер (форма) блоков  $l_b$ , нм;
- угол разориентировки блоков  $\alpha_b$ , град;
- размер областей когерентного рассеяния  $\langle D \rangle$ , нм;
- среднее квадратическое смещение атомов, вызванное статическими искажениями решетки  $\langle u^2_\tau \rangle$ , нм<sup>2</sup>;
- среднее квадратическое смещение атомов, вызванное их тепловыми колебаниями  $\langle u^2 \rangle$ , нм<sup>2</sup> и др.

*Фазовый состав* характеризуют числом и концентрацией фаз, распределением фаз по поверхностному слою, типом кристаллической структуры фаз, объемом сплава и др. При этом под фазой понимают однородные составные части системы, имеющие одинаковый состав, одно и то же агрегатное состояние и отделенные от остальных частей поверхностями раздела.

Основные параметры фазового состава:

- число, концентрация и распределение фаз;
- тип кристаллической структуры фаз;
- параметры решетки фаз  $a, b, c$ , (нм);  $\alpha, \beta, \gamma$ , град.

*Химический состав* характеризуется элементным составом сплава и фаз, концентрацией элементов в объеме фаз, объеме сплава и др.

Параметры химического состава:

- концентрация (распределение) элементов в поверхностном слое  $C_{\chi}$ , %;
- концентрация элементов в фазах  $C_{\phi}$ , % и др.

Исследования химического состава поверхностного слоя позволяют оценить адсорбцию из окружающей среды молекул и атомов органических и неорганических веществ, диффузионные процессы, процессы окисления и др., происходящие при обработке металлов.

Методы исследования физического и химического состояния поверхностного слоя позволяют дать объяснения явлениям, происходящим в поверхностном слое при обработке и установить их связь со свойствами металла.

Однако параметры физико-химического анализа довольно сложно определяются, связать их с технологией можно только на эмпирическом уровне. Для решения технологических задач в большинстве случаев достаточно знания о средних показателях состояния довольно большой группы атомов материала. Это позволяет перейти от микроскопического уровня анализа материала к макроуровню. В этом случае металл рассматривается не как дискретная, а как сплошная среда. Ее поведение описывается уравнениями механики сплошных сред, которые устанавливают связь кинематических характеристик (деформированного состояния) с силовыми (напряженное состояние). Эта связь устанавливается на основе принятия специальных гипотез и постановки соответствующих экспериментов.

Механическое состояние включает параметры:

- сопротивления металла деформированию: предел упругости, предел пропорциональности, предел текучести, предел прочности, твердость и др.;
- пластичности: относительное удлинение, относительное сужение, ударная вязкость и др., устанавливаемые специальными испытаниями образцов.

В процессе пластической деформации, которая всегда сопровождает механическую обработку, все характеристики механического состояния поверхностного слоя изменяются: показатели сопротивления деформированию увеличиваются, а показатели

пластичности уменьшаются. Это явление называется деформационным упрочнением или наклепом.

Параметры упрочнения (наклепа):

- глубина наклепа  $h$ , мкм;
- степень наклепа  $\delta$ , %;
- градиент наклепа  $u_\delta$ , МПа/мм, и др.

Важной характеристикой механического состояния поверхностного слоя являются остаточные напряжения.

Остаточные напряжения – это упругие напряжения, которые остались в детали после обработки (после снятия нагрузки). В зависимости от объемов тела, в которых рассчитывают остаточные напряжения (ОН), они условно подразделяются на напряжения:

- первого рода  $\sigma'_{\text{ост}}$ , уравновешенные в макрообъемах тела;
- второго рода  $\sigma''_{\text{ост}}$ , уравновешенные в пределах размера зерен;
- третьего рода  $\sigma'''_{\text{ост}}$ , уравновешенные в пределах нескольких межатомных расстояний (статические искажения решетки).

Состояние поверхностного слоя после обработки дополнительно может быть охарактеризовано интенсивностью экзоэлектронной эмиссии, совокупностью параметров акустической эмиссии, магнитными шумами (эффектом Баркгаузена), электрохимическим потенциалом и другими эффектами.

Приведенная классификация характеристик состояния ПС базируется в основном на классических параметрах инженерии поверхности, физики и химии металлов. Она не содержит и не отражает в неявной форме ряд дефектов ПС, которые часто встречаются в производственных условиях и создают большие трудности при изготовлении деталей ответственного назначения. Так, в ряде случаев при полировании на поверхности образуется слой с аморфной стекловидной структурой (слой Бейльби) [8]. Толщина его соизмерима с размерами зерен полирующего абразивного материала (обычно 1...15 мкм). Причиной его образования могут служить мгновенные «вспышки» температур и временные термические напряжения, возникающие при периодическом контакте зерен абразива с обрабатываемой поверхностью. Металл ПС как бы расплавляется, а затем, не успев кри-

сталлизоваться, быстро застывает в стекловидном состоянии. Слой Бейльби термодинамически неустойчив и кристаллизуется при подогреве до  $(0,4...0,6)T_{пл}$  (температуры плавления).

### 6.3 Шероховатость поверхности

#### 6.3.1 Параметры шероховатости

В соответствии с ГОСТ 2789–73, шероховатость поверхности – это совокупность неровностей с относительно малыми шагами, образующих рельеф поверхности [6]. Шероховатость поверхности определяется по ее профилю, который представляет собой линию пересечения поверхности плоскостью, перпендикулярной направлению неровностей. Профиль рассматривается на длине базовой линии; при определении параметров ее профиля отсчет высот микронеровностей производится от средней линии (рис. 6.6).

Оценка и нормирование шероховатости поверхности осуществляется по 6 основным параметрам.

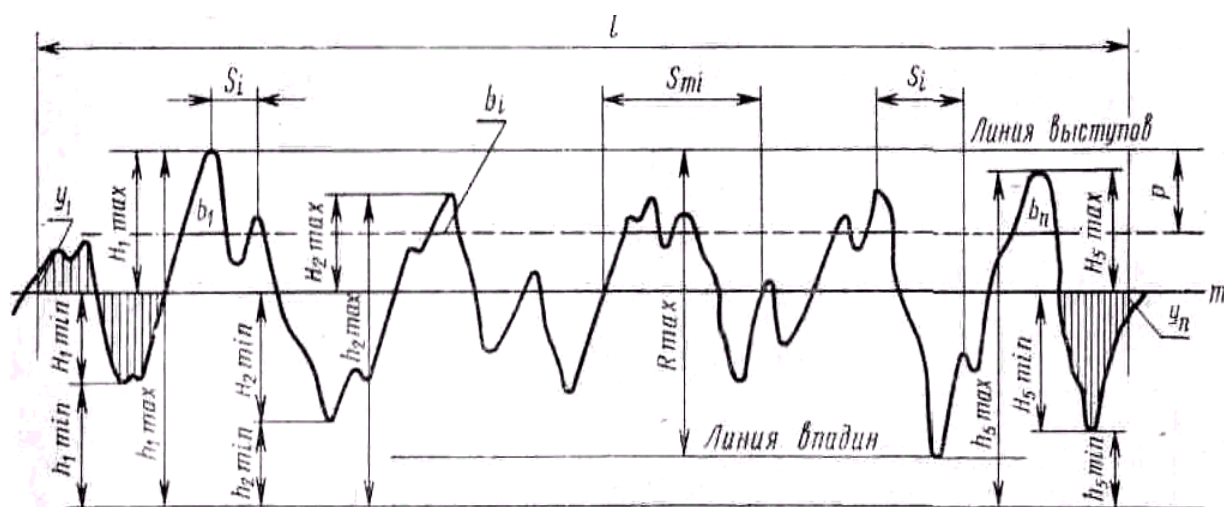


Рис. 6.6. Профилограмма шероховатости поверхности

Среднее арифметическое отклонение профиля  $R_z$  (мкм) – среднее арифметическое абсолютных значений отклонений профиля в пределах базовой длины:

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

где  $l$  – базовая длина;  $n$  – число выбранных точек профиля на базовой длине;  $y$  – расстояние между любой точкой профиля и средней линией.

Высота неровностей профиля по десяти точкам  $Rz$  (мкм) – сумма средних абсолютных значений высоты пяти наибольших выступов профиля и глубин пяти наибольших впадин профиля в пределах базовой длины:

$$Rz = 1/5 \left[ \sum_{i=1}^5 |y_{p_i}| + \sum_{i=1}^5 |y_{v_i}| \right],$$

где  $y_{p_i}$  – высота  $i$ -го наибольшего выступа профиля;  $y_{v_i}$  – глубина  $i$ -й наибольшей впадины профиля.

Высотные параметры  $Ra$  и  $Rz$  являются основными при оценке шероховатости по ГОСТ 2789-73. Параметр  $Ra$  рекомендуется применять для поверхностей с большой ( $Rz > 20$  мкм) и малой ( $Rz < 0,08$  мкм) шероховатостью, параметр  $Ra$  – для поверхностей со средней шероховатостью ( $0,08 < Rz < 20$ , т.е.  $0,02 < Ra < 5$ ). Это определяется техническими возможностями существующих методов и приборов для оценки параметров шероховатости.

Наибольшая высота неровностей профиля  $Rmax$  (мкм) – расстояние между линией выступов профиля и линией впадин профиля в пределах базовой длины:

$$Rmax = Rp + Rv.$$

Высотный параметр  $Rmax$  служит для характеристики равномерности неровностей, в частности, глубины отдельных рисок.

Средний шаг неровностей профиля  $Sm$  (мм) – среднее значение шага неровностей профиля в пределах базовой длины:

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

где  $n$  – число шагов неровностей вдоль средней линии в пределах базовой длины;  $Sm_i$  – шаг неровностей профиля, равный длине отрезка средней линии, пересекающего профиль в трех соседних точках, и ограниченного двумя крайними точками.



Средний шаг местных выступов профиля  $S$  (мм) – среднее значение шага местных выступов профиля в пределах базовой длины:

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

где  $n$  – число шагов неровностей по вершинам в пределах базовой длины;  $S_i$  – шаг неровностей профиля по вершинам, равный длине отрезка средней линии между проекциями на нее двух наивысших точек соседних выступов профиля.

Относительная опорная длина профиля  $t_p$  (%) – отношение опорной длины профиля на заданном уровне  $p$  выступов к базовой длине (%):

$$t_p = \eta_p / l,$$

где  $\eta_p$  – опорная длина профиля – сумма длин отрезков  $b_i$ , отсекаемых на заданном уровне  $p$  в материале профиля линией, эквидистантной средней линии  $m$  в пределах базовой длины;

$$\eta_p = \sum_{i=1}^n b_i.$$

Уровень сечения профиля  $p$  – расстояние между линией выступов профиля и линией, пересекающей профиль эквидистантно линии выступов профиля. Линия выступов профиля – линия, эквидистантная средней линии, проходящая через высшую точку профиля, проходящая через высшую точку профиля в пределах базовой длины. Значения уровня сечения профиля  $p$  отсчитывают по линии выступов и выбирают из ряда: 5; 10; 15; 20; 30; 40; 50; 60; 70; 80; 90 от  $R_{\max}$ .

Параметр  $t_p$  дает наиболее полное представление о форме неровностей, степени заполнения профиля металлом и его жесткости. По кривым изменения  $t_p$  по высоте уровня сечения профиля (опорной кривой) можно судить о форме неровностей и его жесткости (рис. 6.7).

Между параметрами  $Ra$ ,  $Rz$  и  $R_{\max}$  установлены следующие корреляционные связи:

- точение и магнитно-абразивная обработка:  $Rz = 5Ra$ ;

- шлифование и суперфиниширование:  $Rz = 5,5Ra$  ;
- поверхностное пластическое деформирование (ППД), полирование и притирка (плосковершинная):  $Rz = 4Ra$  .

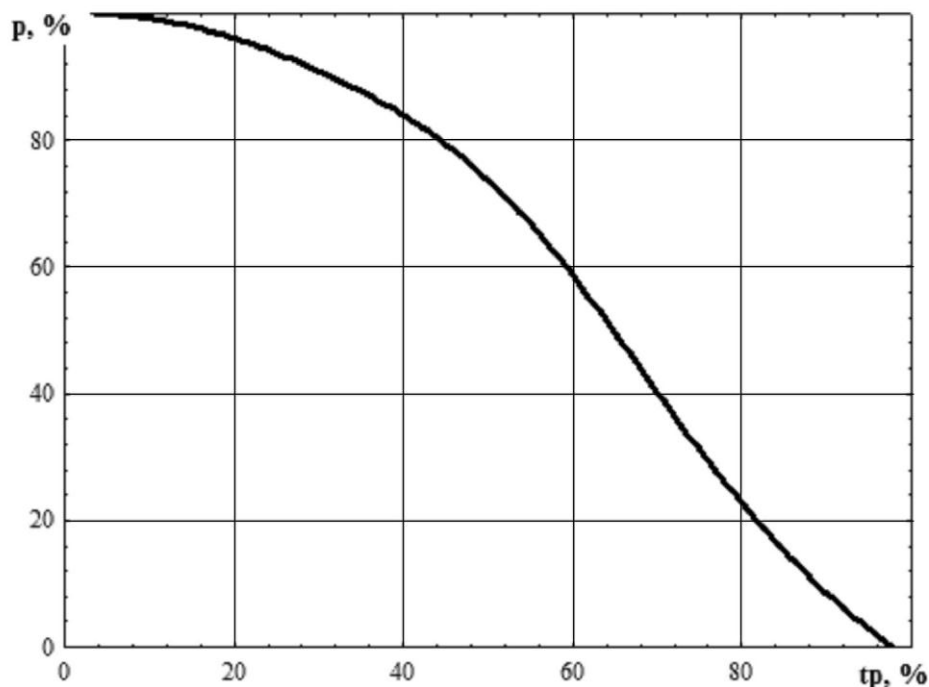


Рис. 6.7. Опорная кривая профиля

Между параметрами  $Ra$ ,  $Rz$  и  $R_{max}$  имеется определенная зависимость (табл. 6.1).

Таблица 6.1

Зависимость между параметрами шероховатости поверхности

$Ra$ , мкм	$Rz, R_{max}$ , мкм	$l$ , мм
До 0,025	До 0,1	0,08
0,025–0,4	0,1–1,6	0,25
0,4–3,2	1,6–12,5	0,8
3,2–12,5	12,5–50	2,5
12,5–100	50–400	8,0

Кроме того, для ответственных поверхностей проводят нормирование шероховатости с использованием дополнительных параметров:

- среднее квадратическое (геометрическое) отклонение профиля  $Rq$ , мкм:

$$Rq = \sqrt{\frac{1}{l} \int_0^l y_i^2 dx} \text{ или } Rq = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n y_i^2}{n}};$$

- максимальная высота, измеренная от выступа до дна впадины на профиле в пределах оценочной длины участка измерения  $Rt$ , мкм;
- максимальная высота профиля над средней линией (высота сглаживания профиля) в пределах базовой длины  $Rp$ , мкм;
- максимальная глубина профиля ниже средней линией (глубина сглаживания профиля) в пределах базовой длины  $Rv$ , мкм;
- скошенность  $Rsk$  – мера асимметрии кривой распределения высот относительно средней линии (рис. 6.8).



Рис. 6.8. Схема к определению высотных параметров шероховатости: справа – кривая распределения выступов и впадин

- средний арифметический наклон профиля  $\Delta a$ :

$$\Delta a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{\Delta y_i}{\Delta x_i} \right|,$$

где  $\Delta x_i$  – расстояние между абсциссами двух соседних точек профиля;

- средний квадратический наклон профиля  $\Delta q$ :

$$\Delta q = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{\Delta y_i}{\Delta x_i} \right)^2};$$

- средняя квадратическая длина волны профиля  $\lambda_q$ :

$$\lambda_q = 2\pi \frac{Rq}{\Delta q};$$

- средняя длина волны профиля  $\lambda_a$ :

$$\lambda_a = 2\pi \frac{Ra}{\Delta a};$$

- длина растянутого профиля  $L_0$ :

$$L_0 = \sum L_{0i};$$

$$L_{0i} = \sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2};$$

где  $L_{0i}$  – длина профиля между двумя соседними точками;

- относительная длина профиля  $l_0$ :

$$l_0 = \frac{L_0}{l};$$

- плотность выступов профиля  $D$ :

$$D = \frac{l}{Sm};$$

- коэффициент заполнения профиля  $kv$ :

$$kv = 1 - \frac{Rp}{R_{\max}};$$

- радиус кривизны выступа профиля  $R_{\text{вс}}$ :

$$R_{\text{вс}} = \frac{9Ra^2 Sm^2}{128(Rp - 0,5Ra)^3};$$

- радиус кривизны впадины профиля  $R_{\text{вп}}$ :

$$R_{\text{вп}} = \frac{9Ra^2 Sm^2}{128(5,5Ra - Rp)^3}.$$

### 6.3.2 Обозначения шероховатости поверхности

Изменения, внесенные в ГОСТ 2.309–73 «ЕСКД. Обозначения шероховатости поверхностей» Межгосударственным советом по стандартизации, метрологии и сертификации, касаются как

обозначения шероховатости поверхностей, так и правил их нанесения на чертеж [9]. Межгосударственный стандарт ГОСТ 2.309 полностью соответствует стандарту ИСО 1302:2002.

Шероховатость поверхностей обозначают на чертеже для всех выполняемых по данному чертежу поверхностей изделия, независимо от методов их образования, кроме поверхностей, шероховатость которых не обусловлена требованиями конструкции.

Структура обозначения шероховатости поверхности приведена на рис. 6.9. При применении знака без указания параметра и способа обработки его изображают без полки.

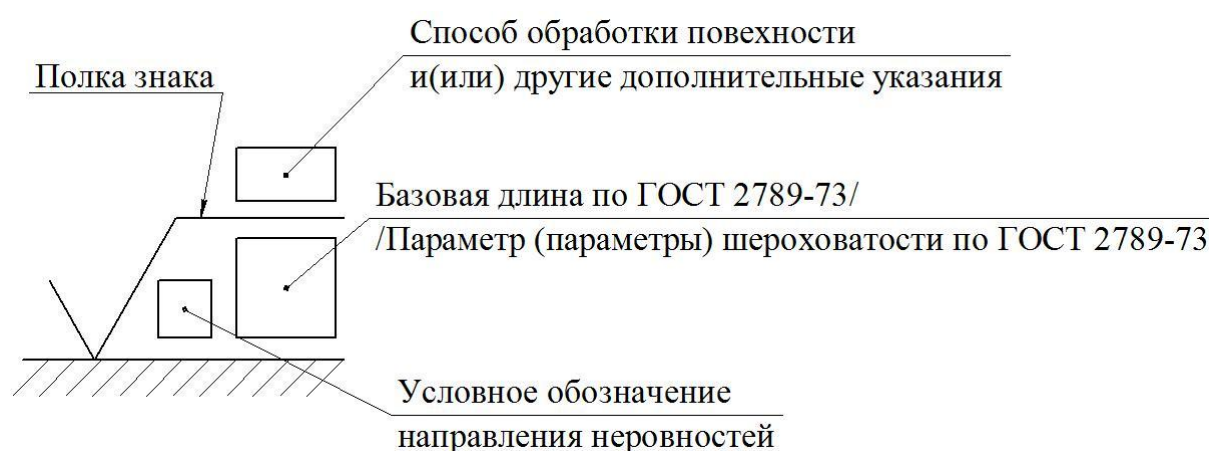


Рис. 6.9 Структура обозначения шероховатости поверхности

В обозначении шероховатости поверхности применяют один из знаков, изображенных на рис. 6.10.

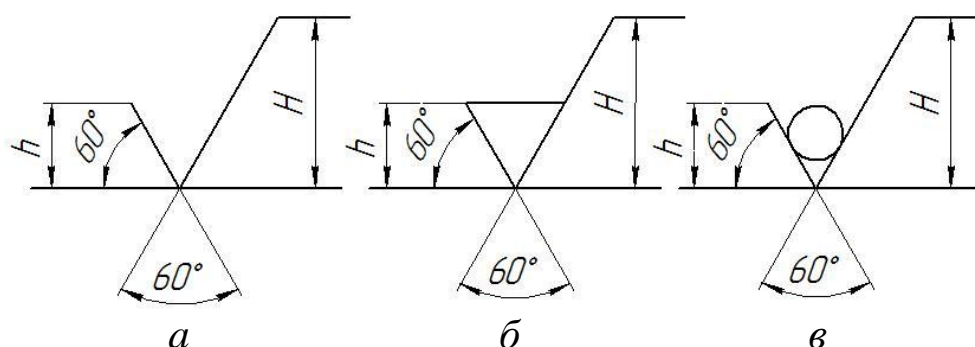


Рис. 6.10 Условные знаки для обозначения шероховатости поверхности

Высота  $h$  должна быть приблизительно равна применяемой на чертеже высоте цифр размерных чисел. Высота  $H$  равна  $(1,5...5)h$ . Толщина линий знаков должна быть приблизительно

равна половине толщины сплошной основной линии, применяемой на чертеже. В обозначении шероховатости поверхности, способ обработки которой конструктором не устанавливается, применяют знак по рис. 6.10, *а*. В обозначении шероховатости поверхности, которая должна быть образована только удалением слоя материала, применяют знак по рис. 6.10, *б*. В обозначении шероховатости поверхности, которая должна быть образована без удаления слоя материала, применяют знак по рис. 6.10, *в* с указанием значения параметра шероховатости.

Поверхности детали, изготовляемой из материала определенного профиля и размера, не подлежащие по данному чертежу дополнительной обработке, должны быть отмечены знаком по рис. 6.10, *в* без указания параметра шероховатости. Состояние поверхности, обозначенной таким знаком, должно соответствовать требованиям, установленным соответствующим стандартом или техническими условиями, или другим документом, причем на этот документ должна быть приведена ссылка, например, в виде указания сортамента материала в графе 3 основной надписи чертежа по ГОСТ 2.104-2006.

Значение параметра шероховатости по ГОСТ 2789-73 указывают в обозначении шероховатости после соответствующего символа, например:  $Ra\ 0,4$ ;  $R\ max\ 6,3$ ;  $Sm\ 0,63$ ;  $t_{50}\ 70$ ;  $S\ 0,032$ ;  $Rz\ 50$ . В примере  $t_{50}\ 70$  указана относительная опорная длина профиля  $t = 70\%$  при уровне сечения профиля  $p = 50\%$ .

При указании наибольшего значения параметра шероховатости в обозначении приводят параметр шероховатости без предельных отклонений, например:  $\sqrt{Ra\ 0,4}$ ;  $\sqrt{Rz\ 50}$ .

При указании наименьшего значения параметра шероховатости после обозначения параметра следует указывать «min», например:  $\sqrt{Ra\ 3,2\ min}$ ;  $\sqrt{Rz\ 50\ min}$ .

При указании диапазона значений параметра шероховатости поверхности в обозначении шероховатости приводят пределы значений параметра, размещая их в две строки, например:

$$\sqrt{Ra\ \begin{matrix} 0,8 \\ 0,4 \end{matrix}}; \sqrt{t_{50}\ \begin{matrix} 70 \\ 50 \end{matrix}}$$

В верхней строке приводят значение параметра, соответствующее более грубой шероховатости.

При указании номинального значения параметра шероховатости поверхности в обозначении приводят это значение с предельными отклонениями по ГОСТ 2789-73, например:  $Ra\ 1+20\%$ ;  $Rz\ 100_{-10\%}$ ;  $Sm\ 0,63^{+20\%}$ ;  $t_{50}\ 70\pm 40\%$ .

При указании двух и более параметров шероховатости поверхности в обозначении шероховатости значения параметров записывают сверху вниз в порядке, представленном на рис. 6.11 (см. также рис. 6.9).

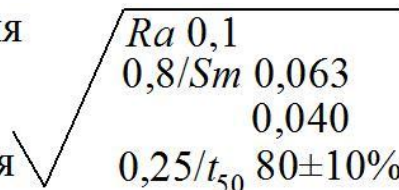
Параметр высоты неровностей профиля	
Параметр шага неровностей профиля	
Относительная опорная длина профиля	

Рис. 6.11 Порядок записи параметров шероховатости

При нормировании требований к шероховатости поверхности параметрами  $Ra$ ,  $Rz$ ,  $R\max$  базовую длину в обозначении шероховатости не приводят, если она соответствует указанной в приложении 1 ГОСТ 2789-73 для выбранного значения параметра шероховатости.

Условные обозначения направления неровностей должны соответствовать приведенным в табл. 6.2.

Условные обозначения направления неровностей приводят на чертеже при необходимости.

Высота знака условного обозначения направления неровностей должна быть приблизительно равна  $h$ . Толщина линий знака должна быть приблизительно равна половине толщины сплошной основной линии.

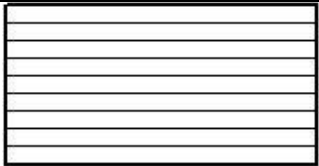
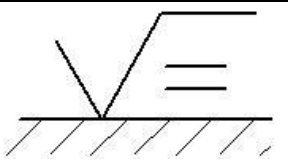
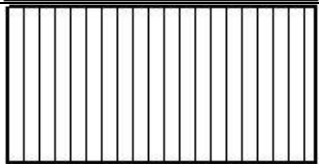
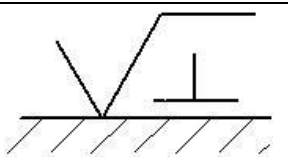
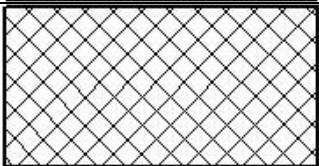
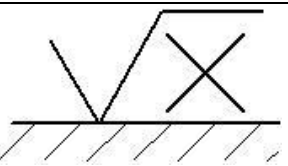
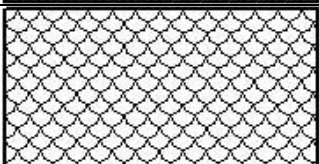

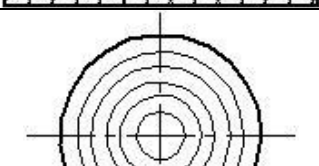
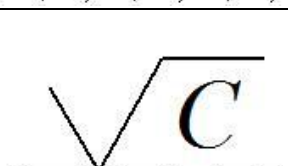
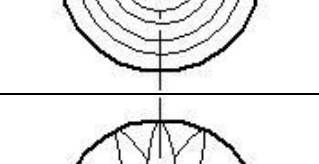

Вид обработки поверхности указывают в обозначении шероховатости только в случаях, когда он является единственным, применимым для получения требуемого качества поверхности (рис. 6.12).

Полировать  
 $\sqrt{Ra\ 0,025}$

Рис. 6.12 Схема указания вида обработки

Таблица 6.2

Условные обозначения направления неровностей

Направление неровностей	Схематическое изображение	Обозначение
Параллельное		
Перпендикулярное		
Перекрещивающееся		
Произвольное		
Кругообразное		
Радиальное		



Направление неровностей	Схематическое изображение	Обозначение
—		

Допускается применять упрощенное обозначение шероховатости поверхностей с разъяснением его в технических требованиях чертежа по примеру, указанному на рис. 6.13.

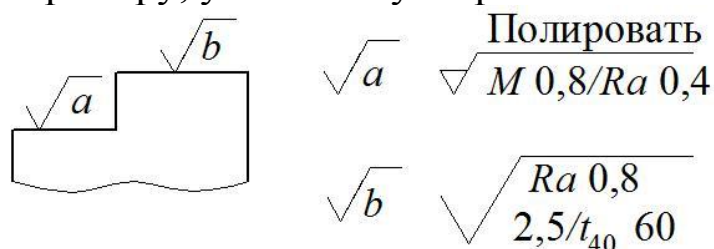


Рис. 6.13 Схема упрощенного обозначения шероховатости поверхностей

Обозначения шероховатости поверхностей на изображении изделия располагают на линиях контура, выносных линиях (по возможности ближе к размерной линии) или на полках линий-выносок. Допускается при недостатке места располагать обозначение шероховатости на размерных линиях или на их продолжениях, на рамке допуска формы, а также разрывать выносную линию (рис. 6.14).

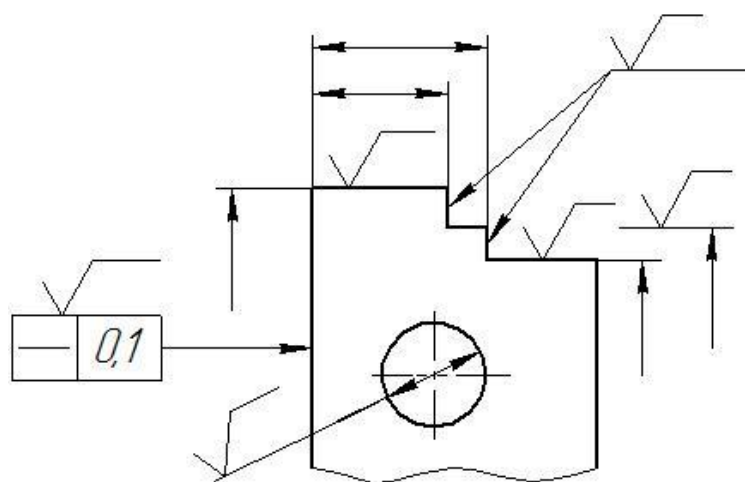


Рис. 6.14 Схема обозначения шероховатости поверхностей на изображении изделия

Обозначения шероховатости поверхности, в которых знак имеет полку, располагают относительно основной надписи чертежа так, как показано на рис. 6.15, *а* и *б*, а если знак не имеет полки, то так, как показано на рис. 6.15, *в*.

При расположении поверхности в заштрихованной зоне обозначение наносят только на полке линии-выноски.

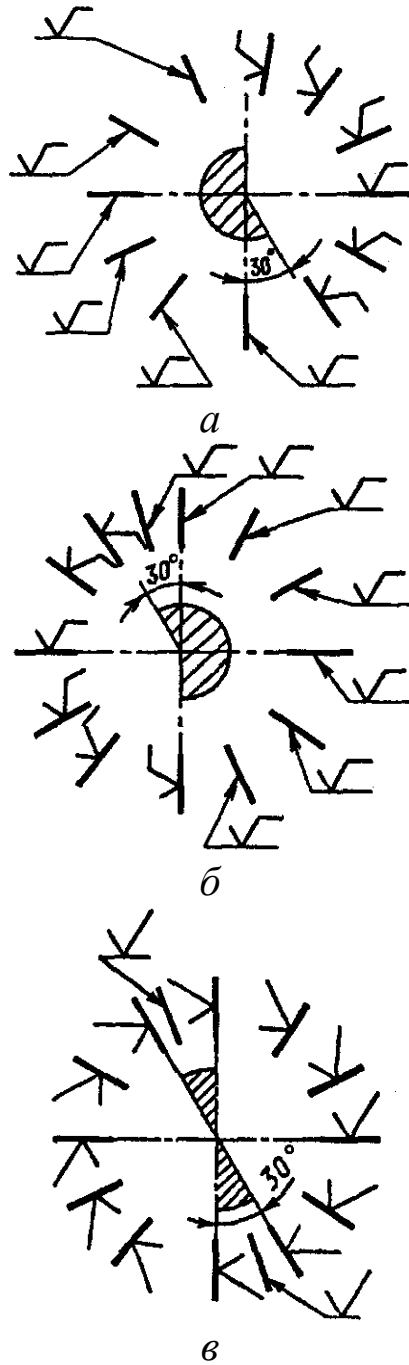


Рис. 6.15 Схема расположения знаков шероховатости поверхности

При указании одинаковой шероховатости для всех поверхностей изделия обозначение шероховатости помещают в правом верхнем углу чертежа и на изображении не наносят (рис. 6.16). Размеры и толщина линий знака в обозначении шероховатости, вынесенном в правый верхний угол чертежа, должны быть приблизительно в 1,5 раза больше, чем в обозначениях, нанесенных на изображении.

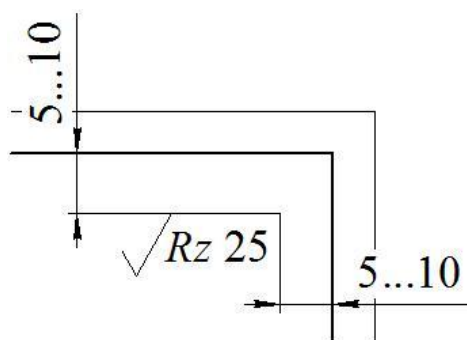
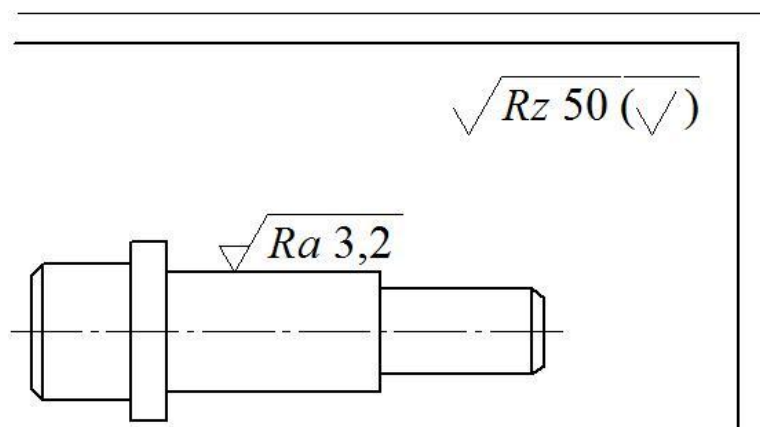


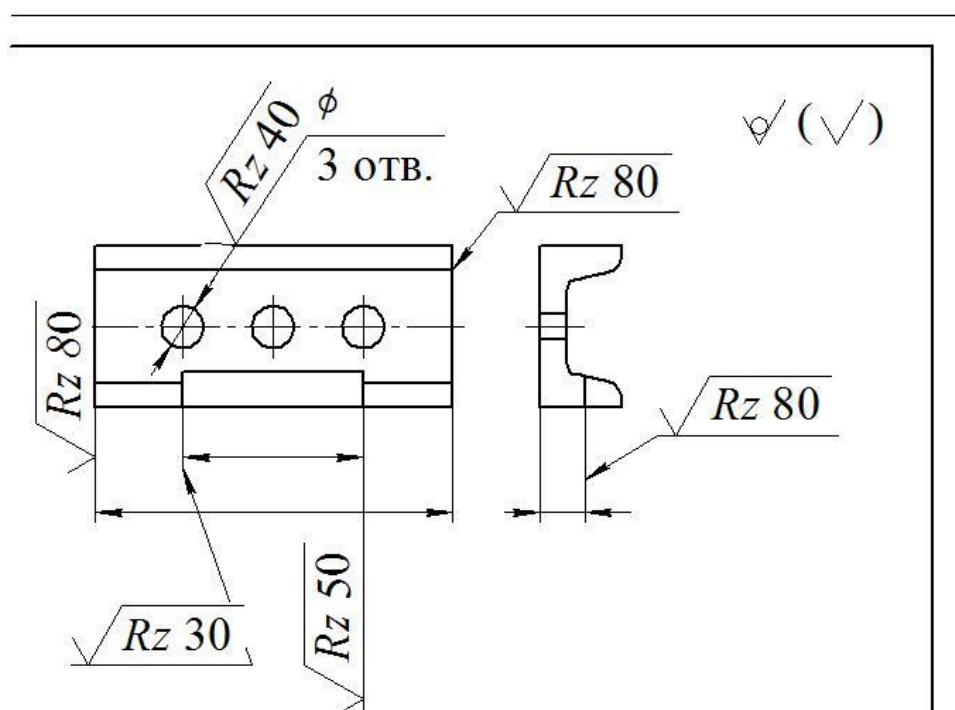
Рис. 6.16 Схема расположения обозначения шероховатости в правом верхнем углу чертежа

Обозначение шероховатости, одинаковой для части поверхностей изделия, может быть помещено в правом верхнем углу чертежа (рис. 6.17–6.18) вместе с условным обозначением ( $\sqrt{\quad}$ ). Это означает, что все поверхности, на которых на изображении не нанесены обозначения шероховатости или знак  $\sqrt{\quad}$ , должны иметь шероховатость, указанную перед условным обозначением ( $\sqrt{\quad}$ ). Размеры знака, взятого в скобки, должны быть одинаковыми с размерами знаков, нанесенных на изображении.

Если шероховатость одной и той же поверхности различна на отдельных участках, то эти участки разграничивают сплошной тонкой линией с нанесением соответствующих размеров и обозначений шероховатости (рис. 6.18, а). Через заштрихованную зону линию границы между участками не проводят (рис. 6.18, б).



a



б

Рис. 6.17 Схемы обозначения шероховатости

Обозначение шероховатости рабочих поверхностей зубьев зубчатых колес, эвольвентных шлицев и т.п., если на чертеже не приведен их профиль, условно наносят на линии делительной поверхности (рис. 6.19, а-в), а для глобоидных червяков и сопряженных с ними колес – на линии расчетной окружности (рис. 6.19, г).

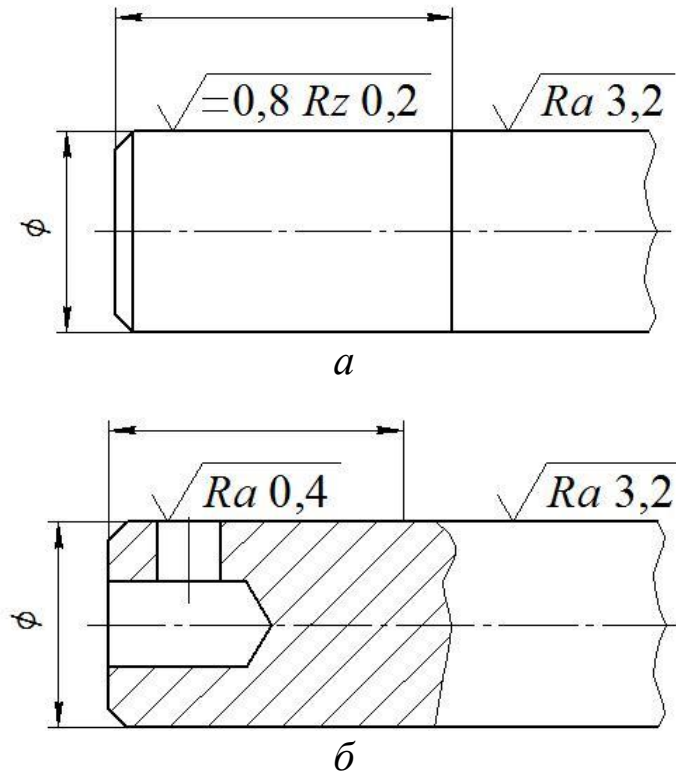


Рис. 6.18 Схемы обозначения на поверхностях, имеющих различную шероховатость

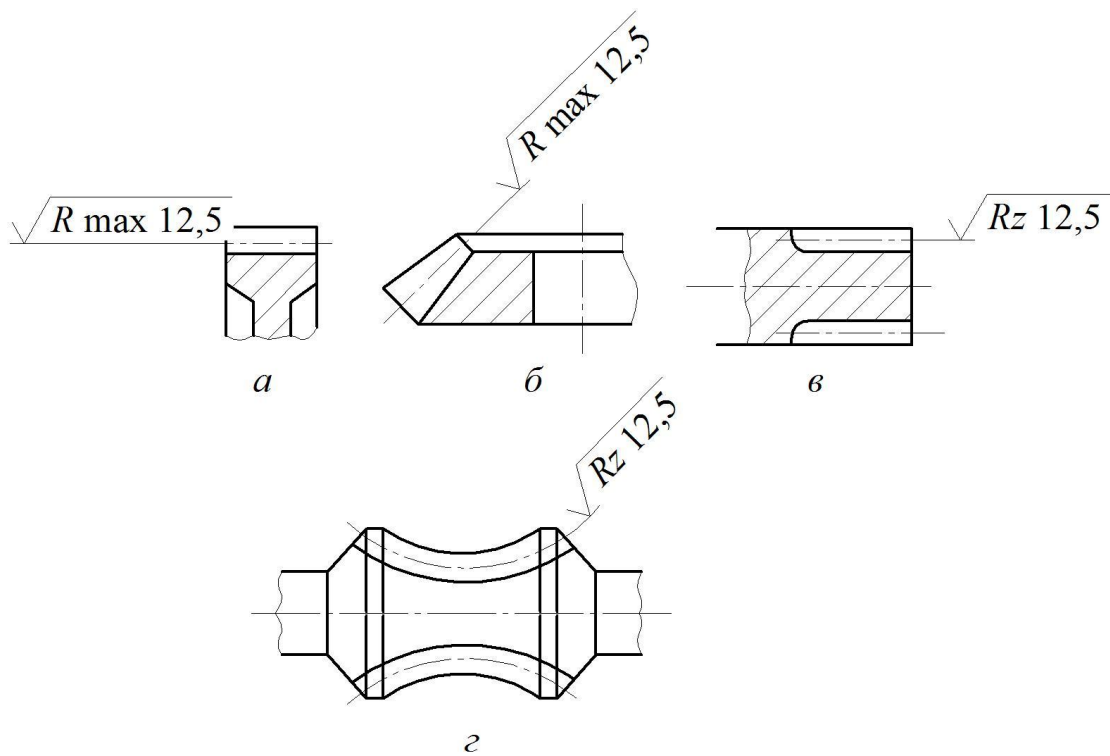


Рис. 6.19 Схема обозначения шероховатости поверхностей зубчатых профилей

Обозначение шероховатости поверхности профиля резьбы наносят по общим правилам при изображении профиля (рис. 6.20, *a*), или условно на выносной линии для указания размера резьбы (рис. 6.20, *б-д*), на размерной линии или на ее продолжении (рис. 6.20, *e*). Знаком «\*» на рис. 6.20, *д* отмечено место нанесения обозначения резьбы.

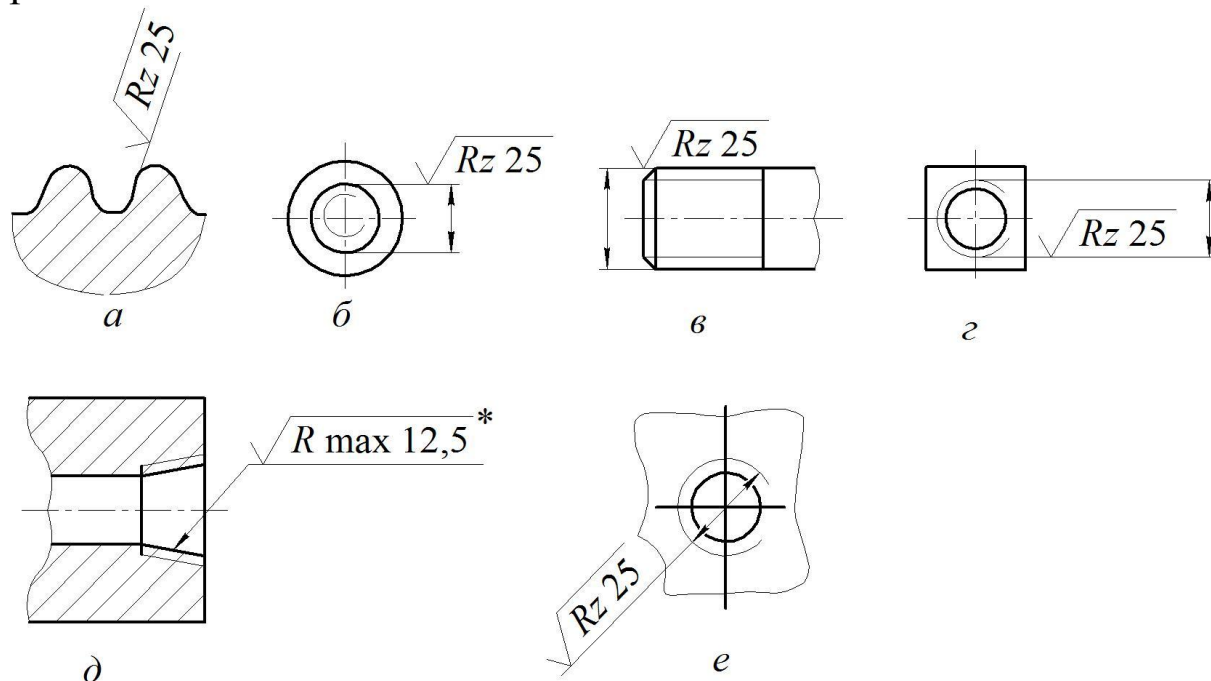


Рис. 6.20 Обозначение шероховатости поверхности профиля резьбы

Если шероховатость поверхностей, образующих контур, должна быть одинаковой, обозначение шероховатости наносят один раз в соответствии с рис. 6.21. Диаметр вспомогательного знака  $\circ$  – 4...5 мм.

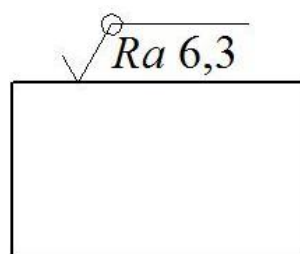


Рис. 6.21 Схема обозначения одинаковой шероховатости поверхностей, образующих контур

В обозначении одинаковой шероховатости поверхностей, плавно переходящих одна в другую, знак  $\circ$  не приводят (рис. 6.22).

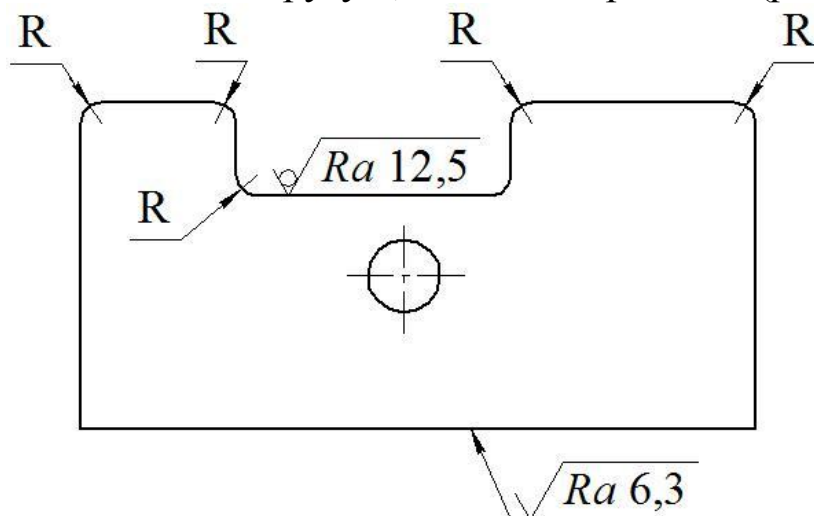


Рис. 6.22 Обозначение одинаковой шероховатости поверхностей, плавно переходящих одна в другую

Обозначение одинаковой шероховатости поверхности сложной конфигурации допускается приводить в технических требованиях чертежа со ссылкой на буквенное обозначение поверхности, например:

... "Шероховатость поверхности А -  $\sqrt{Ra\ 1,6}$  "

При этом буквенное обозначение поверхности наносят на полке линии-выноски, проведенной от утолщенной штрихпунктирной линии, которой обводят поверхность на расстоянии 0,8...1 мм от линии контура (рис. 6.23).

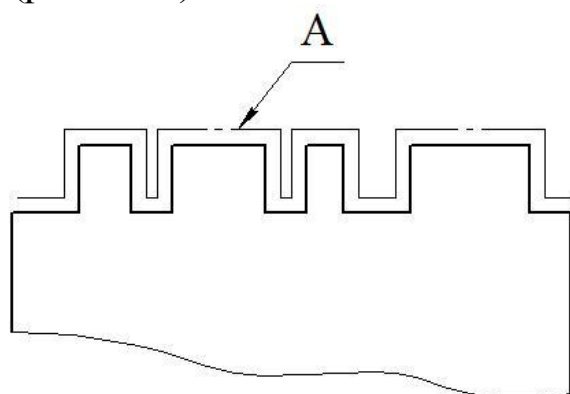


Рис. 6.23 Схема нанесения буквенного обозначения поверхности

Перечисленный в п. 6.3.1 комплекс параметров шероховатости поверхности позволяет охарактеризовать высоту, шаг и форму микрорельефа. При одинаковых высотных параметрах микрорельеф может иметь разную форму, шаг и различное влияние на эксплуатационные свойства детали (рис. 6.24).

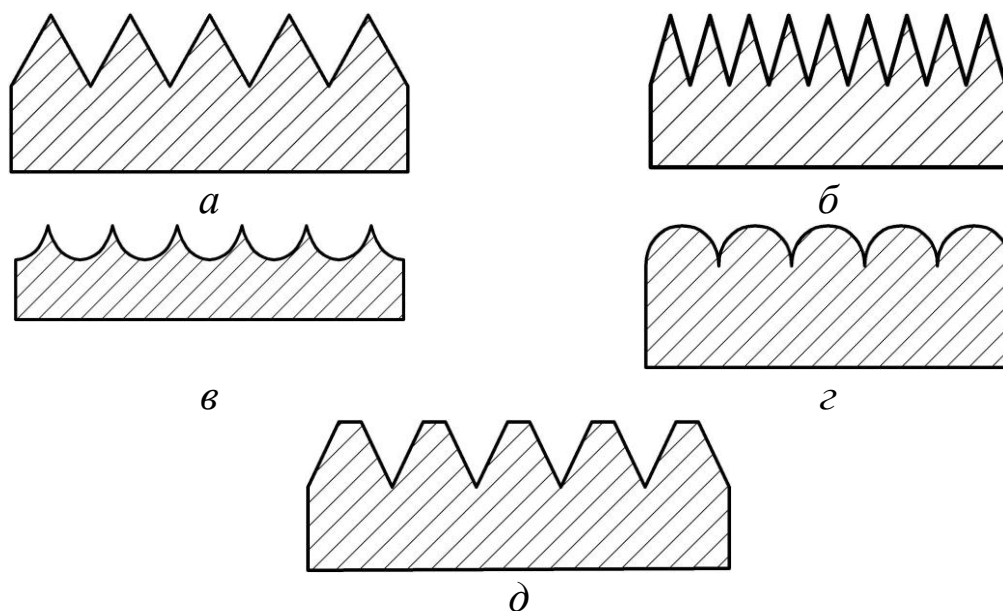


Рис. 6.24 Микропрофиль поверхности: *а, б* – среднежесткий; *в* – маломягкий; *г, д* – жесткий

### 6.3.3 Методы и средства оценки шероховатости поверхности

Оценка шероховатости поверхности может осуществляться качественными и количественными методами путем использования контактных или бесконтактных приборов и получения результатов прямым или косвенным измерением.

*Качественные методы* оценки основаны на сравнении обработанной поверхности с образцами шероховатости.

Контроль шероховатости путем сравнения со стандартными образцами или аттестованной деталью широко используется в цеховых условиях. Шероховатость поверхности детали сравнивается визуально (невооруженным глазом или через лупу) с поверхностью образца из того же материала и обработанного тем же способом, что и деталь (рис. 6.25). Метод сравнения обеспечивает надежную оценку шероховатости поверхности в пределах



$Ra$  0,8...6,3. Более чистые ( $Ra$  0,1...0,4) поверхности сравниваются с помощью специальных микроскопов сравнения.



Рис. 6.25 Эталоны шероховатости поверхности

*Количественные методы* основаны на измерении микронеровностей специальными приборами – *бесконтактными и контактными*.

Наибольшее распространение для *бесконтактных измерений* шероховатостей получили оптические приборы: светового сечения, теневой проекции и интерференции света.

В интерференционных средствах измерения шероховатости поверхности используется интерференция двух или большего числа когерентных пучков лучей (вышедших из одной точки источника света, имеющих одинаковое направление колебаний, одинаковые частоты и постоянную разность фаз). К ним относят микроинтерферометры двухлучевые (МИИ-4, МИИ-5, МИИ-15), однообъективный (МИИ-9), иммерсионно-репликовый (МИИ-10), предназначенные для измерения профильным методом неровностей поверхности высотой от 0,03 до 1,0 мкм деталей, обладающих достаточной отражательной способностью.

Многолучевой микроинтерферометр МИИ-11 используется при измерении неровностей микропрофиля, имеющих ступенчатую форму.

Микропрофилометр МИИ-12 предназначен для визуальной оценки и измерения высоты произвольно расположенных неровностей на наружных поверхностях, обладающих хорошей отражательной способностью. Измерение высоты неровностей производится в диапазоне от 0,1 до 0,8 мкм (рис. 6.26). Пучок лучей от осветителя 1 проходит через коллектор 2, апертурную диафрагму 3, линзы 4 и 7 и полевую диафрагму 6, отражаясь от пластин 5 и 8, и поступает на отражательную пластину 11, на которой нанесен светоделительный слой. Параллельный пучок лучей, отраженный от пластины 11, собирается линзами интерференционного объектива 10 в точку на исследуемой поверхности 9, затем, отразившись от нее, снова проходит через интерференционный объектив и пластину 11.

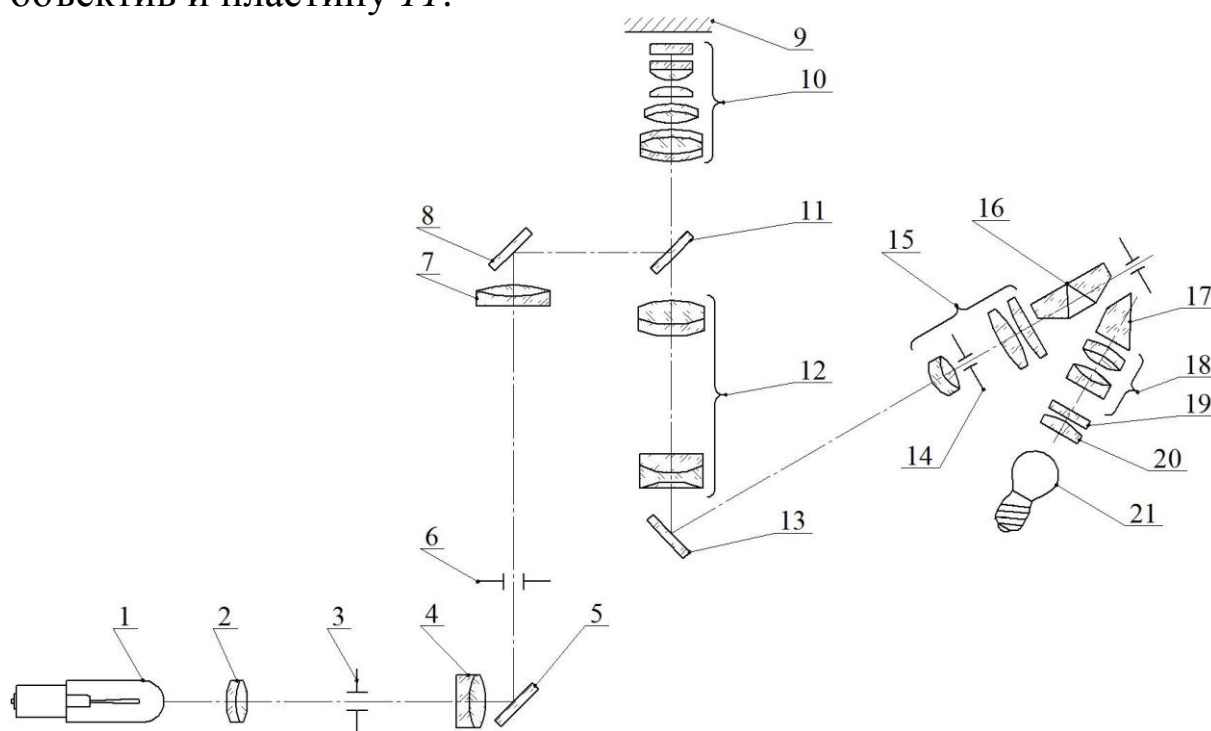


Рис. 6.26 Оптическая схема микропрофилометра МИИ-12

В результате сложения (интерференции) двух систем волн в поле зрения окуляра наблюдаются интерференционные полосы. Если на испытуемой поверхности встречается бугор или впадина, то в этом месте изменяется разность хода между интерферирующими

лучами, что вызывает искривление полос. Изображение испытуемой поверхности и интерференционных полос проектируется зрительной трубой, состоящей из телеобъектива 12, отражательной пластины 13 и окуляра 15, в плоскость щели 14, служащей для ограничения участка испытуемой поверхности. За окуляром 15 расположена спектральная призма 16. Она разворачивает узкую полосу, содержащую изображение испытуемой поверхности, в спектр, на котором видны чередующиеся черные и цветные интерференционные полосы.

Отсчетное устройство прибора следующее. Лампа 21 посредством коллектора 20 освещает прозрачный штрих, нанесенный на пластине 19, установленной в фокальной плоскости окуляра 18. Пластина 19 может перемещаться при вращении винта с отсчетным барабаном. Призма 17 отражает пучок лучей на выходную грань спектральной призмы 16, которая одновременно является зеркалом, направляющим изображение светящегося штриха отсчетного устройства в глаз наблюдателя.

Микроинтерферометр МИИ-15 может быть использован для измерения высоты неровностей поверхностей малогабаритных деталей сложной конфигурации. Прибор построен по схеме двухобъективного микроинтерферометра. В качестве поверхности сравнения использована не плоскость, а сменные эталонные поверхности различной кривизны и отражательной способности (коэффициент отражения 0,04-0,09). При контроле шероховатости поверхностей, имеющих близкий к эталонной поверхности радиус кривизны, интерференционные полосы прямолинейны и эквидистантны. Это особенно важно при контроле деталей малых размеров.

На рис. 6.27 представлен общий вид прибора. На массивном основании 18 корпуса прибора смонтирована стойка 3, в которой собрана оптическая схема прибора и предметный столик 15. Для перемещения предметного столика в двух взаимно перпендикулярных направлениях служат микровинты 1. Для фиксации положения предметного столика предусмотрена рукоятка 17. Грубую фокусировку на исследуемый объект можно осуществить перемещением столика по вертикали с помощью винта 2, а точную фокусировку – с помощью механизма 16. На стойке 3 смонтированы головка микроскопа 9 и осветительное устройство, со-

держашее источник света 6, конденсор 7 с полевой 4 и апертурной 5 диафрагмами и фильтр монохроматического света 8.

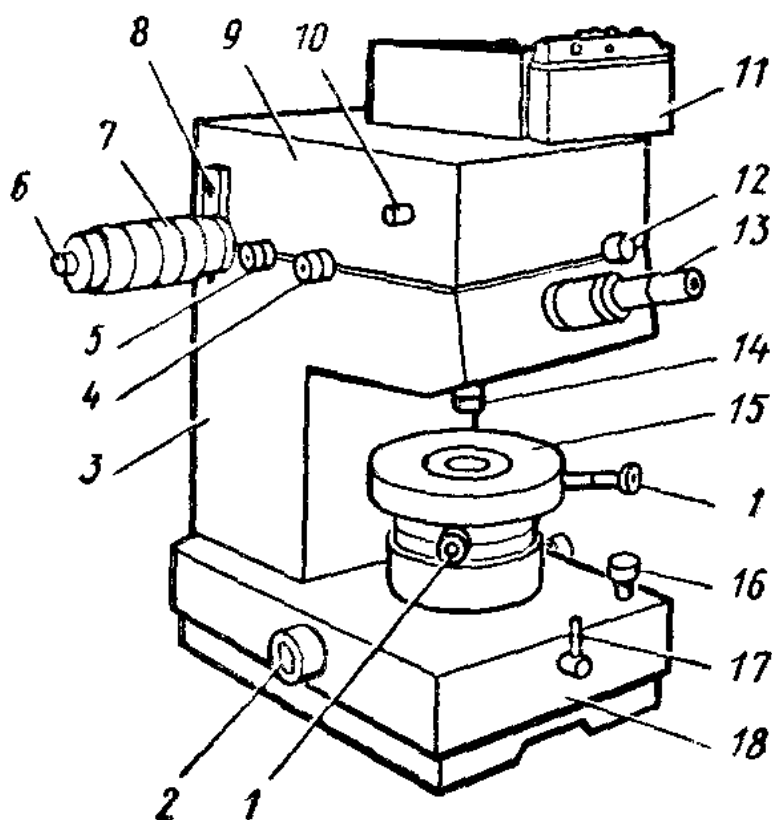


Рис. 6.27 Микроинтерферометр МИИ-15

На головке микроскопа 9 снаружи укреплены: объектив 14, окуляр 13, фотоаппарат 11, рукоятка переключения лучей для визуального наблюдения или фотографирования 10 и рукоятка шторы включения ветви сравнения 12.

Вместо окуляра может быть использована спектральная насадка, и тогда МИИ-15 преобразуется в микропрофилометр, т.е. его можно в этом случае использовать для контроля поверхностей с беспорядочными следами обработки.

Метод светового сечения относится к профильным методам измерения неровностей поверхности и заключается в том, что одним микроскопом (проекционным) на исследуемую поверхность направляется под некоторым углом узкий пучок света, при этом на ней получается граница тени от непрозрачной шторы, введенной в часть светового пучка, падающего на поверхность. Гра-

ница света и тени (световое сечение) подобна профилю в сечении поверхности плоскостью, и по ее конфигурации можно судить о расположении, форме и размерах неровностей на испытуемой поверхности. Второй микроскоп (наблюдательный), расположенный под углом  $2\alpha=90^\circ$  относительно первого, служит для наблюдения полученного светового сечения поверхности.

На рис. 6.28 пояснен принцип измерения неровностей методом светового сечения на двойном микроскопе МИС-11. Расположенная параллельно поверхности  $P_1$  узкая щель  $S$ , освещенная лампой через защитное стекло и конденсор (на рисунке не показаны), проектируется в виде узкой светящейся линии объективом  $O_1$  на поверхность  $P_1$  имеющую ступеньку  $P_2$  высотой  $H$ . Изображение щели  $S$  на ступеньке претерпевает излом (на поверхности  $P_1$  центром изображения щели является точка  $S_1^I$ , а на поверхности  $P_2$  – точка  $S_2^I$ ).

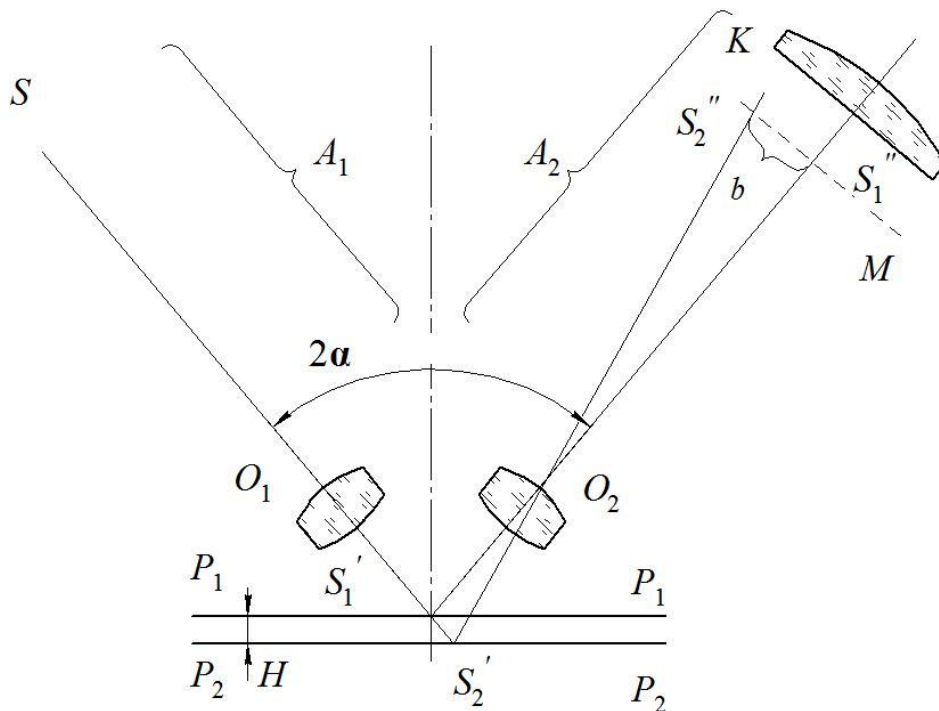


Рис. 6.28 Оптическая схема микроскопа МИС-11

Объектив  $O_2$ , ось которого наклонена к исследуемой поверхности (так же, как и ось проекционного микроскопа) на  $45^\circ$ , создает в плоскости сетки  $M$  окулярного винтового микрометра  $K$  изображения  $S_1^{II}$  и  $S_2^{II}$  щели, отраженные от исследуемой поверх-

ности. В поле зрения окуляра эти изображения наблюдают в виде двух узких участков поверхности: участка  $P_1$ , на котором располагается изображение  $S_1^{\text{II}}$  щели, и участка  $P_2$ , на котором располагается изображение  $S_2^{\text{II}}$ . Расстояние  $b$  между этими изображениями измеряют с помощью винтового окулярного микрометра.

При измерении на двойном микроскопе МИС осветителем 12 служит электрическая лампочка, которая получает питание от сети переменного тока напряжением через трансформатор, прилагаемый к прибору (рис. 6.29).

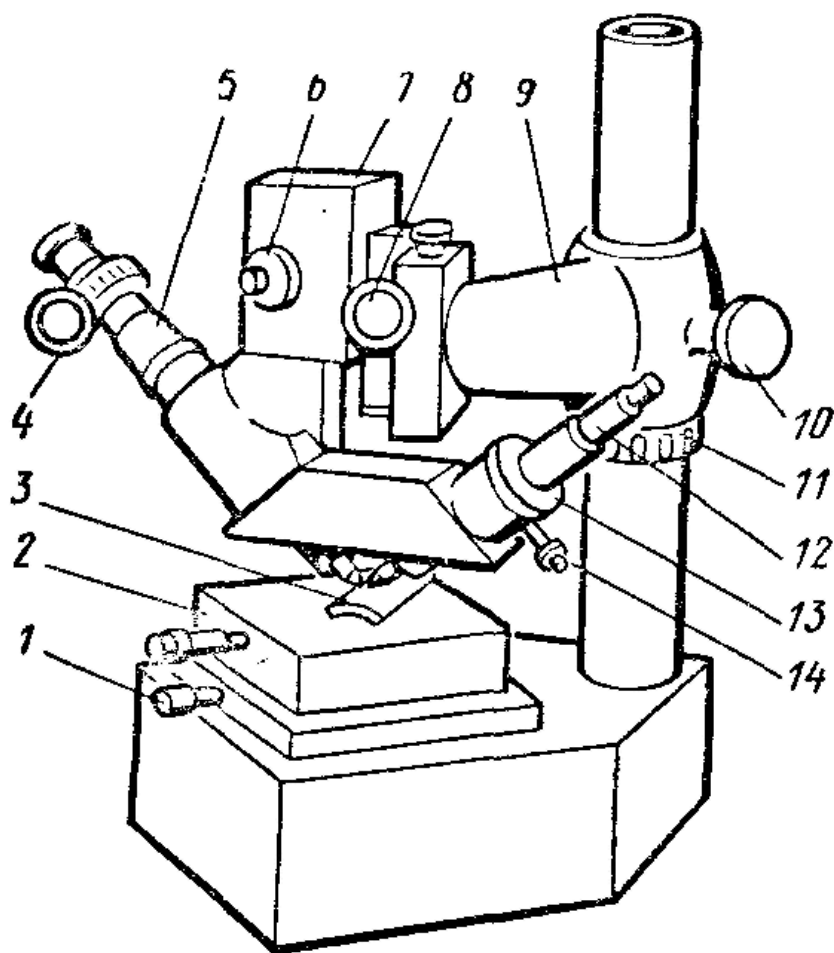


Рис. 6.29 Общий вид микроскопа МИС-11

Контролируемую деталь 3 кладут на координатный предметный стол 2, фиксируемый винтом 1. Микроскопы устанавливают предварительно на нужном расстоянии от детали 3, перемещая кронштейн 9 по стопке с помощью кольца 11. Фиксация

кронштейна осуществляется винтом 10 клеммового зажима. Винтом 8 кремальеры и винтом 6 механизма тонкой наводки перемещают по салазкам 7 в вертикальном направлении микроскопы, добиваясь четкого изображения световой щели на поверхности детали.

Это изображение искривляется соответственно неровностям, имеющимся на испытываемой поверхности. Винт 14 служит для установки изображения щели в середине поля зрения окуляра, а кольцо 13 – для регулировки его ширины. Поворотом винтового окулярного микрометра 4 вокруг оси визуального тубуса 5 устанавливают горизонтальную линию перекрестия по общему направлению изображения щели.

Наряду с указанными в промышленности используют приборы теневого сечения (ПТС-1), растровые измерительные микроскопы (ОРИМ-1) и др.

*Контактный метод* реализован в щуповых приборах, работающих по принципу ощупывания поверхности алмазной иглой. К этой группе приборов относятся профилометры, непосредственно показывающие среднее арифметическое отклонение профиля  $Ra$ , и профилографы, записывающие профиль поверхности. Алмазные иглы к профилометрам и профилографам имеют коническую форму с очень малым радиусом закругления при вершине

В России промышленностью выпускаются профилографы-профилометры моделей 201, 202, 252, 280, 171311, а также профилометры моделей 253, 283, 296, 170622, которые позволяют измерять параметр шероховатости до  $Ra$  0,02...0,04.

Профилограф-профилометр модели 252 является высокочувствительным прибором и предназначен для измерения в лабораторных условиях шероховатости и волнистости поверхности изделий, сечение которых в плоскости измерения представляет прямую линию. Параметры шероховатости поверхности, определяемые по цифровому показывающему устройству, –  $Ra$ ,  $Rp$ ,  $Rv$ ,  $t_p$  и  $n$  – число шагов неровностей в пределах длины трассы ощупывания при измерении по базовой линии. Профилограммы получают на записывающем приборе с электротермической записью в прямоугольной системе координат. Диапазон измерений

профилометра по параметру  $Ra$  составляет от 0,02 до 100 мкм. Вертикальное увеличение профилографа ВУ 200...100 000; горизонтальное увеличение профилографа ГУ 0,5...2 000.

Действие прибора основано на принципе ощупывания неровностей исследуемой поверхности алмазным щупом 1 датчика и преобразования, возникающих при этом колебаний щупа в изменения напряжения, пропорциональные этим колебаниям (рис. 6.30).

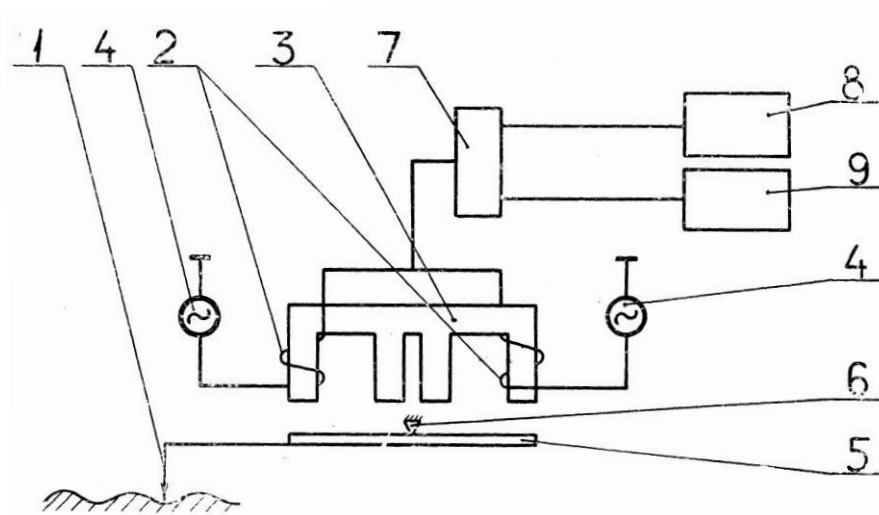


Рис. 6.30 Электрическая схема профилографа-профилометра «Калибр-252»

Сигналы от колебаний иглы датчика 1 поступают в электронный блок 7 с показывающим прибором 8 и записывающим прибором 9. Магнитная система датчика состоит из сдвоенного Ш-образного сердечника 3 с двумя катушками 2. Катушки датчика и две половины первичной обмотки дифференциального входного трансформатора 4 образуют мост, питание которого осуществляется от генератора звуковой частоты 3. При перемещении датчика относительно исследуемой поверхности алмазная игла, ощупывая неровности поверхности, совершает осевые перемещения, приводя в колебательное движение якорь 5. Эти колебания меняют воздушные зазоры между якорем и сердечником 6 и тем самым вызывают изменения напряжения на выходе дифференциального трансформатора 4. Полученные изменения напряжения усиливаются электронным бло-



ком, на выходе которого может быть включен показывающий прибор 8 или записывающий прибор 9.

Профилограф-профилометр «Talysurf-5M» представляет собой измерительную систему модульной конструкции, предназначенную для измерения параметров шероховатости поверхности. С помощью системы могут быть получены графики шероховатости, волнистости или несглаженного профиля [10].

Система включает: стойку с приводом 1, подающее устройство 2, датчик (стандартный) 3, процессор 4 и самописец 5, являющийся интегральной частью процессора (рис. 6.31). Стойка с приводом обеспечивает жесткую монтажную опору для подающего устройства, легкую и точную настройку высоты последнего. Узел также обеспечивает устойчивую опору для измеряемой детали. Три Т-образных паза в рабочем столе 6 могут использоваться для закрепления клиновых блоков, зажимных приспособлений и некоторых принадлежностей системы. При необходимости медленной скорости перемещения иглы датчика 1 используют ручку тонкой ручной настройки 7.

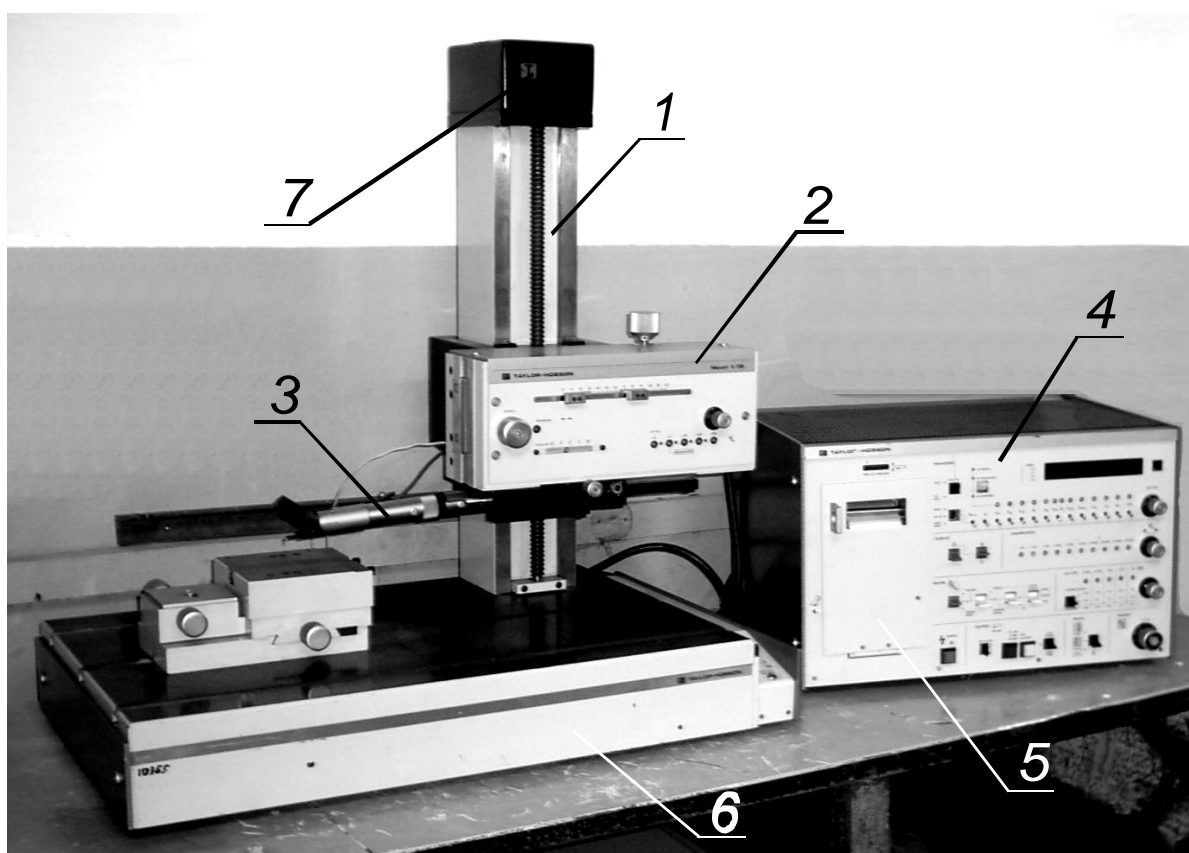


Рис. 6.31 Общий вид профилографа-профилометра «Talysurf-5M»

Процессор включает схемы, необходимые для обработки и хранения информации от датчика, расчета и отображения параметров и управления подающим устройством. Процессор включает также комбинированное устройство, состоящее из алфавитно-цифрового печатающего устройства и графического регистратора.

Технические характеристики процессора: базовые длины: 0,08; 0,25; 0,8; 2,5; 8 мм; вертикальное увеличение  $VУ$ : 100; 200; 500; 1 000; 2 000; 5 000; 10 000; 20 000; 50 000; 100 000; горизонтальное увеличение  $ГУ$ : 2; 5; 10; 20; 50; 100; 200.

Самописец позволяет получить следующие типы графиков: несглаженный профиль (прямое построение графика); сглаженный профиль с удаленным наклоном; модифицированный профиль шероховатости и волнистости; кривая процента несущей поверхности (кривая Аббота-Файрстоуна).

Российскими и зарубежными предприятиями выпускается широкий спектр электронных мобильных и стационарных лабораторных и цеховых приборов и станций для контроля шероховатости, волнистости и контура поверхности.

В настоящее время при проведении тонких научных исследований применяются приборы сканирующего типа, которые позволяют оценивать шероховатость поверхности в трех измерениях (3D). На рис. 6.32 показана топография поверхности, полученная на сканирующем приборе [8].

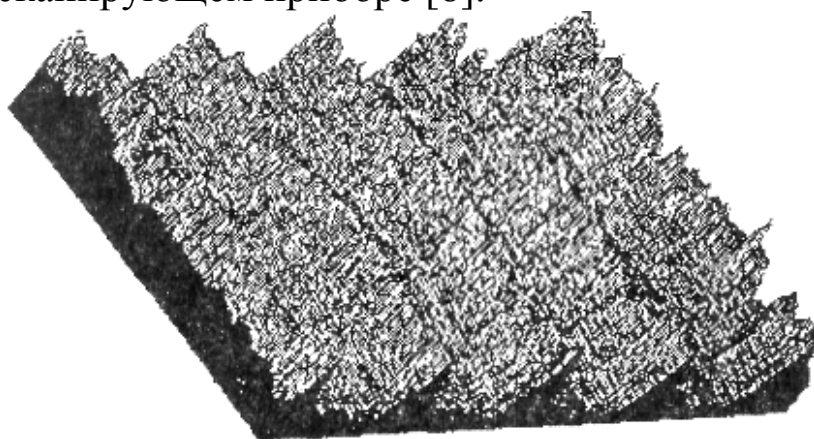


Рис. 6.32 Топография поверхности после строгания

3D-шероховатость оценивается следующими микротопографическими параметрами:  $Ra$  – среднее арифметическое отклонение микроповерхности от средней плоскости;  $N_\gamma$  – число выступов на уровне  $\gamma$ ;  $M_\sigma$  – число вершин выступов;  $h_\sigma$  – высота вершин выступов;  $H_{\max}$  – высота наибольшего выступа;  $h_\gamma$  – относительная опорная площадь;  $\Delta h$  – градиент поверхности;  $K_{\text{cp}}(\gamma)$  – средняя кривизна выступов на уровне  $\gamma$  и др.

Для оценки шероховатости поверхностей деталей больших габаритов, в труднодоступных местах, когда непосредственное применение приборов невозможно, используют метод слепков.

Специально изготовленную массу с силой прикладывают к измеряемой поверхности. После застывания масса отделяется от поверхности, получается слепок, на поверхности которого зеркально повторяются неровности исследуемой поверхности. По измеренной шероховатости поверхности слепка определяют параметры шероховатости контролируемой поверхности детали. В качестве материала для слепка применяют целлулоид, легкоплавкие сплавы, воск, парафин, серу, гипс-хромпик и др. Для измерения шероховатости используют преимущественно бесконтактные методы.

#### 6.4 Волнистость поверхности

Под *волнистостью* понимают совокупность периодически повторяющихся неровностей, у которых расстояния между смежными возвышенностями или впадинами превышают базовую длину.

У детали с круглым сечением к волнистости относят отклонения в поперечном сечении, у которых шаг меньше 1/5 периметра окружности (рис. 6.33).

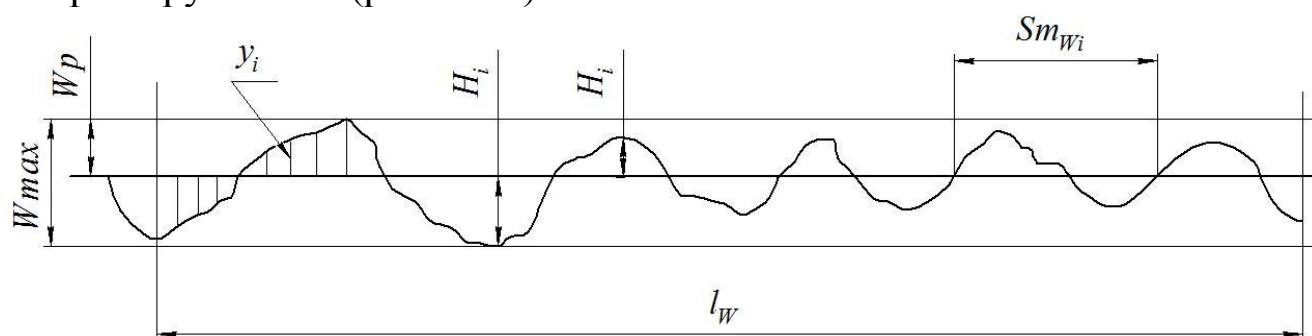


Рис. 6.33 Профилограмма волнистости поверхности

Оценка волнистости поверхности осуществляется по следующим параметрам:

- среднее арифметическое отклонение профиля волн  $Wa$  :

$$Wa = (1/l_w) \int_0^{l_w} |y(x)| dx \text{ или } Wa = (1/n) \sum_{i=1}^n |y_i|,$$

где  $l_w$  – базовая длина;  $y_i$  – текущее значение ординаты профиля волн (расстояние от точки профиля до средней линии);  $n$  – число ординат профиля;

- высота волнистости  $Wz$  – это среднее арифметическое значение из пяти значений высот макронеровностей, определенных на длине участка измерения  $l_w$ , которая должна быть не менее пятикратного наибольшего шага волнистости:

$$Wz = 1/5 \left[ \sum_{i=1}^5 H_i + \sum_{i=1}^5 H_i' \right],$$

где  $H_i$  – текущее расстояние от средней линии до вершины волны;  $H_i'$  – текущее расстояние от средней линии до впадины волны;

- максимальная высота волнистости  $W_{\max}$  – расстояние между наивысшей и наименее точками профиля волнистости, измеренное на одной волне в пределах базовой длины;

- высота сглаживания волнистости  $W_p$  ;
- относительная опорная длина профиля волн  $t_{p_w}$  :

$$T_{p_w} = \frac{\eta_{p_w}}{l_w},$$

где  $\eta_{p_w}$  – опорная длина профиля волн на уровне сечения профиля  $p$  ;

- средний шаг волнистости  $S_{m_w}$  – среднее арифметическое значение расстояний  $S_{m_{w_i}}$  между одноименными  $i$ -ми сторонами соседних волн по средней линии профиля на базовой длине:

$$S_{m_w} = \sum_{i=1}^n \frac{S_{m_{w_i}}}{n},$$

где  $S_{m_{w_i}}$  – текущее значение шага волн;  $n$  – число шагов;

- средний радиус выступов волн  $R_{w_{cp}}$  :

$$\bar{R}_w = \sum_{i=1}^n \frac{R_{wi}}{n},$$

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

Волнистость может быть технологической и эксплуатационной. Технологическая волнистость образуется на поверхности детали при изготовлении в результате вибраций технологической системы, геометрических, кинематических и динамических погрешностей обработки. Технологическую волнистость подразделяют на поперечную (волны расположены перпендикулярно направлению главного движения режущего инструмента) и продольную (волны совпадают с направлением главного движения).

Волнистость поверхности до настоящего времени в России не стандартизована, поэтому на практике используют различные отраслевые нормы и рекомендации. Так, в подшипниковой промышленности при шлифовании колец  $\varnothing 18...120$  мм класса 0 волнистость по высоте составляет 40...110 % шероховатости, а по 4–5 классам – 15...60 %.

В соответствии с рекомендациями Института машиноведения РАН волнистость в зависимости от ее высоты подразделяют на девять классов (табл. 6.3).

Таблица 6.3

### Параметры волнистости

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

Оценка волнистости поверхности может осуществляться визуально, по краске, по оттиску на бумаге и другими способами с определением длины шага волны, числа волн на длине окружности.

Более точная количественная оценка волнистости осуществляется с помощью специальных приборов: волнографов, волномеров, кругломеров, профилографов-профилометров.

### 6.5 Регулярные микрорельефы

*Регулярные микрорельефы (РМР)* – это неровности, которые в отличие от шероховатости одинаковы по форме, размерам и взаиморасположению. В соответствии с ГОСТ 24773–81 поверхности бывают с полностью или частичным регулярным микрорельефом. Для оценки шероховатости поверхности с регулярным микрорельефом с успехом могут быть использованы собственно параметры шероховатости или параметры по ГОСТ 24773–81.

*Вибронакатывание (ВН)* – это рельефообразующая обработка, осуществляемая стальными закаленными шариками с наложением на инструмент дополнительных осциллирующих движений для получения на обрабатываемых поверхностях регулярных микрорельефов (рис. 6.34). В зависимости от траектории движения инструмента на поверхности детали образуются канавки различного рисунка [11].

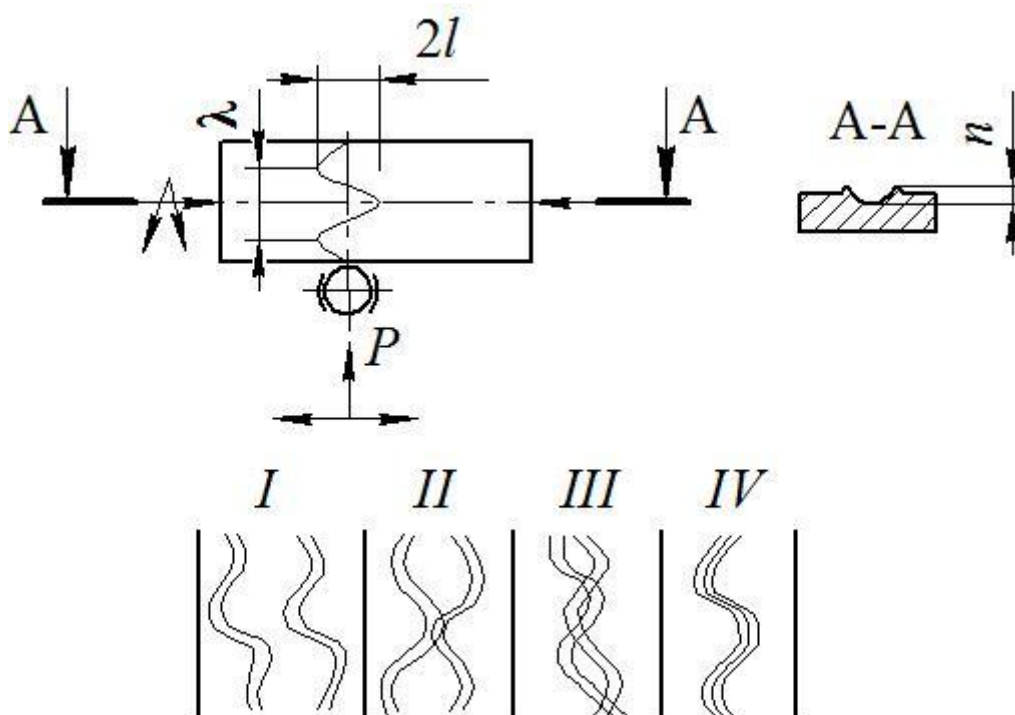


Рис. 6.34 Схема вибронакатывания и виды регулярных микрорельефов: I – канавки не касаются друг друга; II – канавки касаются друг друга; III – канавки пересекаются; IV – канавки накладываются друг на друга

При использовании в качестве инструмента алмазных выглаживателей процесс называют *вибровыглаживанием*.

Основное назначение вибронакатывания – повышение износостойкости и задиростойкости, улучшение прирабатываемости, уменьшение момента трогания, повышение гидроплотности, нанесение декоративного рельефа, увеличение жесткости листовых материалов и др.

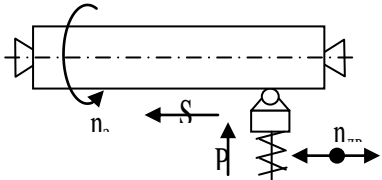
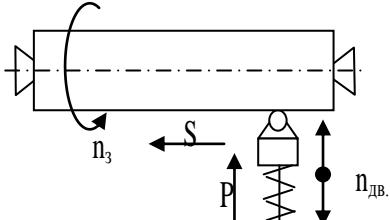
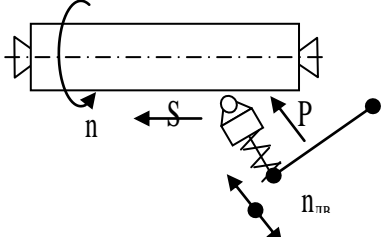
Вибронакатывание осуществляется на металлообрабатывающих станках, преимущественно токарных; осцилляционное движение создается устройствами различных видов.

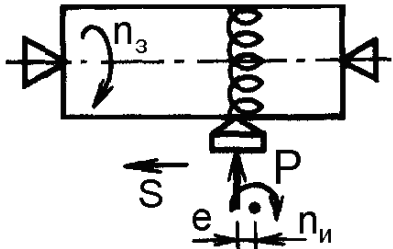
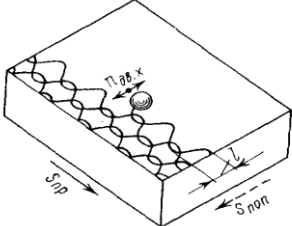
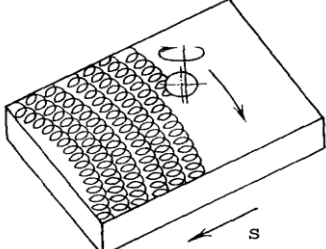
Существует большое количество типов устройства для ВН, отличающихся траекторией движения инструмента (эксцентричное вращение, сложное движение и т.д.) и характером привода вибратора (механический, электромагнитный, гидравлический и т.д.).

В зависимости от поставленной задачи может быть использовано несколько разновидностей вибронакатывания (табл. 6.4).

Таблица 6.4

Основные схемы вибрационного накатывания

Вид ВН	Схема обработки	Наименование вида ВН
1		Вибрационное накатывание
2		Ударное вибрационное накатывание с нормальным направлением вибраций
3		Ударное вибрационное накатывание с неперпендикулярным направлением вибраций

Вид ВН	Схема обработки	Наименование вида ВН
4		Циклоидальное вибрационное накатывание
5		Синусоидальное вибрационное накатывание плоских поверхностей
6		Циклоидальное вибрационное накатывание плоских поверхностей

Наиболее универсальными являются первый, четвертый, пятый и шестой виды, с помощью которых можно образовывать как систему непрерывных канавок, так и полностью новый микрорельеф. Остальные схемы обработки не позволяют создавать систему непрерывных канавок, но с их помощью можно более производительно решать задачи образования нового регулярного микрорельефа.

Процесс ВН в зависимости от кинематики процесса позволяет решать следующие технологические задачи:

- повышение относительной длины опорной линии профиля шероховатости и поверхностной микротвердости;
- образование на рабочих поверхностях деталей системы канавок, улучшающих процесс смазки и приработки поверхностей трения и снижающих их износ;
- формирование на поверхностях деталей регулярных неровностей различной формы и расположения в зависимости от требуемых эксплуатационных характеристик и свойств;



- восстановление размерной точности деталей в определенных пределах за счет перераспределения материала в поверхностном слое;
- создание на сопрягаемых цилиндрических поверхностях винтовых микрошлицев;
- декоративная обработка поверхностей деталей взамен трудоемкой абразивной обработки.

Первая, четвертая, пятая и шестая схемы ВН (см. табл. 6.4) позволяют решать все приведенные технологические задачи, а остальные лишь три последние задачи. Для восстановления размерной точности рекомендуются вторая и третья схемы. Первая схема при определенном сочетании режимов обработки внутренней и наружной сопрягаемых цилиндрических поверхностей позволяет создать на них винтовые микрошлицы, позволяющие передавать крутящий момент. Первая и пятая схемы ВН обладают наименьшей производительностью при решении технологической задачи восстановления размерной точности. Для повышения производительности обработки по данным схемам необходимо существенное увеличение количества деформирующих элементов, что не всегда возможно вследствие возникновения значительных инерционных сил.

На точность обработки при образовании системы канавок ВН практически не оказывает влияния. Изменение размера в данном случае происходит лишь за счет наплывов, образующихся у краев канавок, и составляет несколько микрометров. Изменения других параметров, характеризующих форму детали, не происходит.

Изменение величины размера при образовании полностью нового микрорельефа зависит от параметров исходной шероховатости, от размеров деформирующего элемента и режимов обработки. При обработке ВН по первой, четвертой, пятой и шестой схемам, за счет многократного перераспределения материала поверхностного слоя детали в различных направлениях, наблюдается уменьшение погрешности формы деталей и, в частности, отклонения от круглости для цилиндрических поверхностей. При определенных параметрах режима обработки, пластических свойств детали и ее шероховатости возможно существенное увеличение размера детали или восстановление размерной точности. При этом наблюдается снижение величины опорной поверхности

профиля шероховатости до средней линии. В общем случае можно считать, что точность размеров обработанной детали зависит от схемы и режимов обработки, а также от точности размеров, формы и качества поверхностного слоя детали, полученных на предшествующем переходе.

Вибронакатывание применяется для обработки подшипников скольжения, гильз цилиндров, колонок штампов, крутильных колец-бегунков, направляющих станин, прокатных валков, матриц вытяжных штампов, калибров, шеек валов под манжетные уплотнения, рефлекторов, утюгов, авторучек и других изделий.

## 6.6 Упрочнение (наклеп) поверхностного слоя

### 6.6.1 Параметры упрочнения

Свойства ПС формируются в результате упругопластических деформаций, нагрева (охлаждения), адгезионных и диффузионных процессов, химического взаимодействия с окружающей средой. В процессе обработки ПС подвергается неоднородной по глубине пластической деформации, которая может сопровождаться структурными изменениями. Происходит дробление зерен на фрагменты и блоки с их угловой разориентацией. У поверхности они измельчаются и вытягиваются в направлении усилия деформирования. В результате пластической деформации металл ПС упрочняется.

*Деформационным упрочнением или наклепом* называют увеличение степени пластической деформации и сопротивления деформированию. С точки зрения дислокационной теории деформационное упрочнение является результатом возникновения в пластически деформированном металлическом кристалле большого числа дислокаций и вакансий, их взаимодействия и передвижения под влиянием полей напряжений.

Как было отмечено выше, в процессе пластической деформации, все характеристики механического состояния поверхностного слоя изменяются: показатели сопротивления деформированию увеличиваются, а показатели пластичности уменьшаются. В табл. 6.5 показано изменение механических свойств малоуглеродистой стали (0,06 % C) в результате пластической деформации.

Таблица 6.5

Влияние наклепа на механические свойства  
малоуглеродистой стали (0,06% С)

Удлинение при растяжении, %	Предел пропорциональности, %	Предел текучести, кгс/мм <sup>2</sup>	Предел прочности, кгс/мм <sup>2</sup>	Относительное удлинение, %	Относительное сужение, %	Ударная вязкость, кгс/мм <sup>2</sup>	Твердость HB
0	21,5	23,3	35,5	40,5	75,0	18,0	105
10	39,7	41,3	44,0	21,0	71,8	16,9	145
20	42,1	46	47,0	16,9	68,1	9,6	156
30	46,5	50,2	51,3	10,3	62,1	10,5	164

Параметры упрочнения (наклепа):

- глубина наклепа  $h$ , мкм;
- степень наклепа  $\delta$ , %;
- градиент наклепа  $u_\delta$ , МПа/мм.

В инженерной практике деформационное упрочнение поверхностного слоя в большинстве случаев определяют измерением твердости или микротвердости. Твердость (микротвердость) характеризует сопротивление металла пластическим деформациям и обнаруживает хорошую корреляцию со стандартными механическими характеристиками металла. С использованием методов косого среза или послойного травления поверхностного слоя определяют распределение в нем твердости (микротвердости), а результаты измерения представляют в виде графика, по которому устанавливают параметры упрочнения (рис. 6.35).

При возникновении достаточно сильного теплового потока в ОД, наряду с упрочнением металла в результате пластического

течения может произойти его разупрочнение (см. рис. 6.35, штриховая линия). В этом случае микротвердость отдельных слоев поверхностного слоя уменьшается. Спад эпюры твердости (микротвердости) возможен также из-за торможения пластического течения в зоне контакта инструмента с деталью, из-за «шелушения» металла или в результате погрешности измерения микротвердости на краю шлифа.

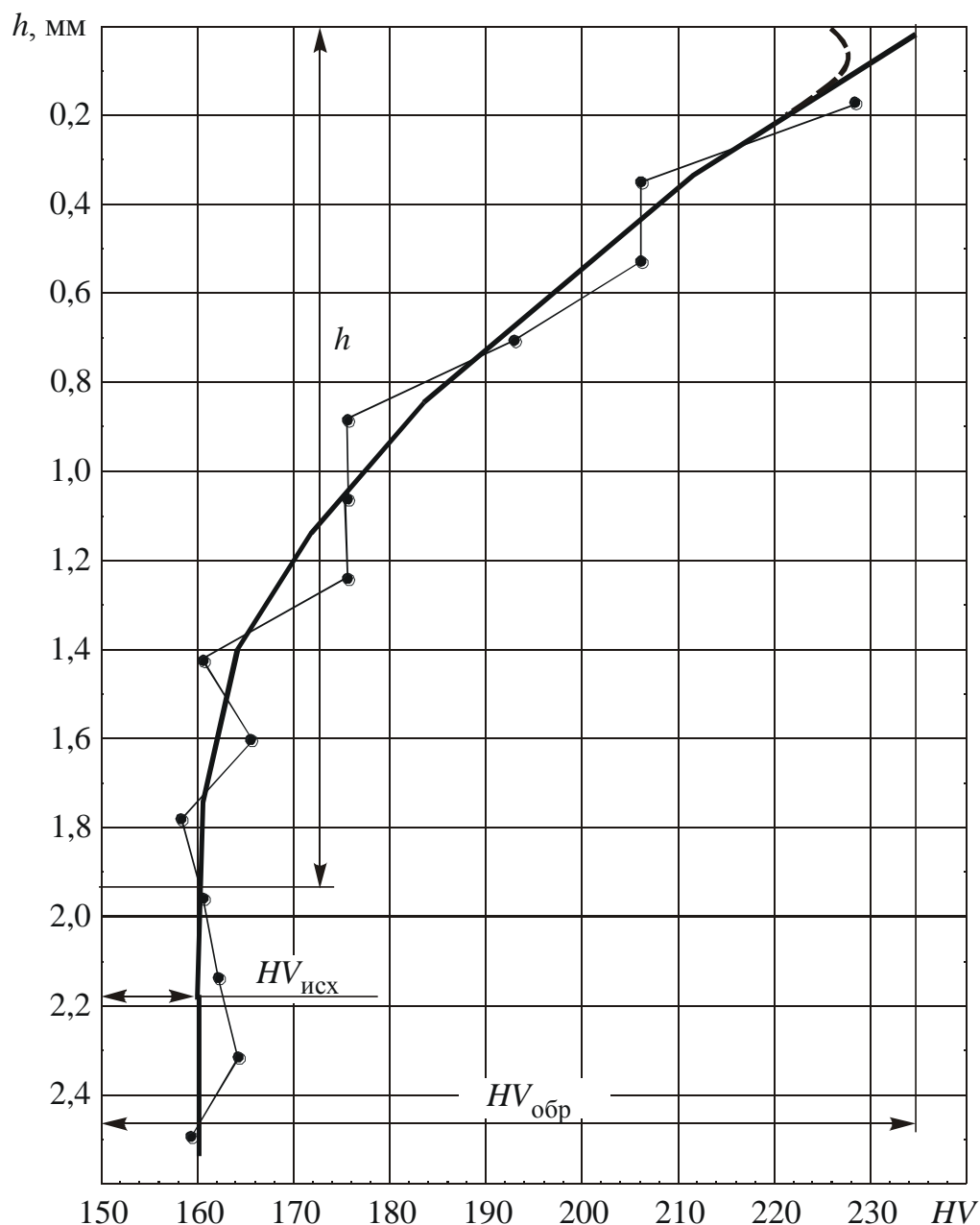


Рис. 6.35. Характерная эпюра распределения твердости по Виккерсу в поверхностном слое после ППД образцов из стали 45: точками обозначены экспериментальные значения (по данным авторов)

Степень деформационного упрочнения зависит не только от режимов, например, ППД, но и от способности материала к упрочнению (рис. 6.36).

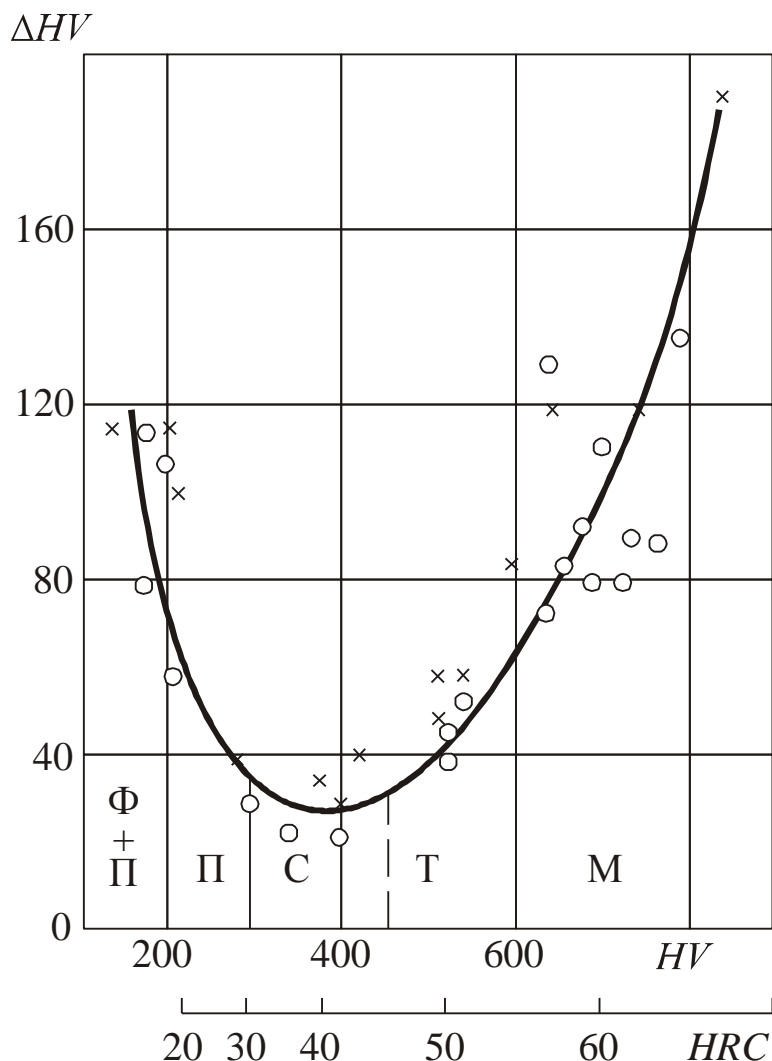


Рис. 6.36. График прироста твердости по Виккерсу  $\Delta HV$  в зависимости от структурного состояния сталей [12]:  $\Phi$  — феррит;  $П$  — перлит;  $С$  — сорбит;  $Т$  — тростит;  $М$  — мартенсит;  $\circ$  — легированные стали;  $\times$  — углеродистые стали

По данному графику устанавливают глубину упрочненного слоя  $h$  как глубину слоя с повышенной твердостью, а степень деформационного упрочнения  $\delta$  и градиент наклепа  $u_\delta$  определяют по формулам:

$$\delta = \frac{H_{\text{обр}} - H_{\text{исх}}}{H_{\text{исх}}} \cdot 100\% = \frac{\Delta H}{H_{\text{исх}}} \cdot 100\%;$$

$$u_{\delta} = \frac{\Delta H}{h};$$

где  $H_{\text{обр}}$  и  $H_{\text{исх}}$  – твердость (микротвердость) металла соответственно после и до обработки.

Глубина наклепанного слоя может колебаться в широких пределах: от нескольких микрометров после финишных процессов обработки (доводка, полирование, хонингование и др.) до 1 и более миллиметров после черновых операций и упрочняющих технологий. В большинстве случаев глубина наклепанного слоя после механической обработки сталей и сплавов находится в пределах 30...150 мкм.

В зависимости от свойств обрабатываемых материалов, вида и режима обработки, размера и состояния инструмента, смазывающих и охлаждающих технологических сред глубина, степень и интенсивность наклепа может изменяться в широких пределах. При механической обработке конструкционных сталей степень наклепа наиболее часто находится в пределах 20...50 %. У сплавов на никелевой основе, жаропрочных и нержавеющей сталей степень наклепа доходит до 80 %, у титановых сплавов, закаленных и высокопрочных сталей – до 10...20 %.

### 6.6.2 Методы определения параметров упрочнения

*Глубина и степень упрочнения* могут определяться рентгеноструктурным методом по изменению ширины дифракционных линий. Рентгенограммы записываются на ленте самописца, и по ним определяется ширина дифракционной линии  $B$  как отношение площади рентгенограммы (от линии фона)  $S$  к высоте рентгенограммы  $h$ , т.е.  $B = S/h$ . Для рентгеноструктурного метода определения степени и глубины наклепа используются установки типа ДРОН и УРС-50НМ и им подобные. Они позволяют определять глубину и степень наклепа с более высокой точностью, чем на приборах твердомерах и микротвердомерах.

Наибольшее распространение для определения параметров упрочнения получили методы микротвердости (твердости).

Метод измерения *микротвердости* вдавливанием алмазных наконечников используется для изделий и образцов из металлов, сплавов, минералов, стекол, пластмасс, полупроводников, керамики, тонких листов, фольги, пленок, гальванических покрытий, химически осажденных и электроосажденных покрытий [13]. Установлены два метода испытаний: по восстановленному отпечатку (основной метод) и по невосстановленному отпечатку (дополнительный метод).

Испытание на микротвердость вдавливанием по методу восстановленного отпечатка заключается в нанесении на испытываемую поверхность изделия (образца) отпечатка под действием статической нагрузки, приложенной к алмазному наконечнику в течение определенного времени. После удаления нагрузки и определения параметров отпечатка определяют число микротвердости.

Число микротвердости определяют делением приложенной к алмазному наконечнику нормальной нагрузки на условную площадь боковой поверхности полученного отпечатка. Используют алмазные наконечники в виде четырехгранной пирамиды с квадратным основанием, трехгранной пирамиды с основанием в виде равностороннего треугольника, четырехгранной пирамиды с ромбическим основанием и бицилиндрические.

Для четырехгранной пирамиды с квадратным основанием число микротвердости вычисляют по формуле

$$HV = \frac{P}{F} = \frac{2 \cdot P \cdot \sin \alpha/2}{d^2} \cong \frac{1,854 \cdot P}{d^2};$$

где  $P$  – нормальная нагрузка, приложенная к алмазному наконечнику, Н (кгс);  $F$  – условная площадь боковой поверхности полученного отпечатка, мм<sup>2</sup>;  $d$  – среднее арифметическое длин обеих диагоналей квадратного отпечатка, мм;  $\alpha = 136^\circ$  – угол заострения алмазного наконечника.

Испытание на микротвердость вдавливанием по методу невосстановленного отпечатка заключается в нанесении на испытываемую поверхность изделия (образца) отпечатка под действием статической нагрузки, приложенной к алмазному наконечнику в течение определенного времени, с одновременным измерением глубины отпечатка. Данные испытания проводят, когда требуют-

ся дополнительные характеристики материала (упругое восстановление, релаксация, ползучесть при нормальной температуре). Число микротвердости определяют делением приложенной к алмазному наконечнику нормальной нагрузки на условную площадь боковой поверхности полученного отпечатка, соответствующую его измеренной глубине.

Микротвердость измеряют на приборах семейства ПМТ. Микротвердомер ПМТ-3 предназначен для измерения микротвердости путем вдавливания в исследуемую поверхность квадратной четырехгранной алмазной пирамиды с углом при вершине  $136^\circ$ . При испытании применяют нагрузки 0,049; 0,098; 0,196; 0,490; 0,981; 1,962 Н (гири массой 5, 10, 20, 50, 100, 200 г). Общее увеличение микроскопа прибора составляет  $\times 487$ .

Штатив прибора составляют массивное основание 1 и жесткая колонка 4 (рис. 6.37).

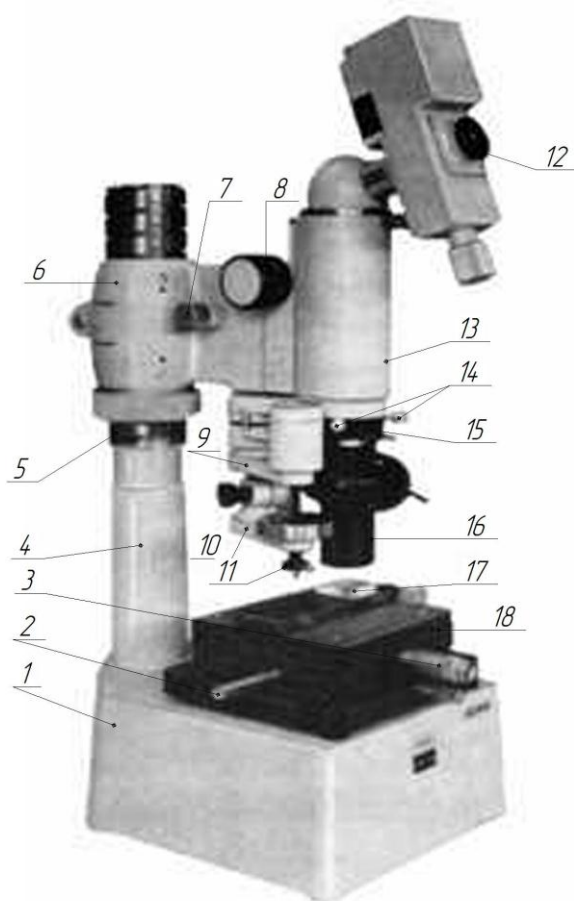


Рис. 6.37 Общий вид прибора ПМТ-3

Вращением гайки 4 по ленточной резьбе, нарезанной на колонке, можно поднимать и опускать кронштейн 6, поддержива-



ющий измерительный микроскоп *13* с объективом *16*, осветителем *15* и окуляр-микрометром *12*. При помощи винтов *14* регулируют положение объектива относительно тубуса. С тубусом микроскопа соединено легкое нагружающее устройство *9*, несущее индентор *11* и гирьку *10*.

Вращая ручку механизма макроподдачи *8*, можно дать микроскопу ускоренное перемещение для грубой настройки на резкость изображения. Для тонкой фокусировки микроскопа служит механизм микроподдачи, который приводится в действие ручкой *7*. На ручке механизма микроподдачи укреплен лимб, одно деление которого соответствует  $0,002$  мм перемещения микроскопа.

Исследуемый объект *17*, микротвердость которого нужно определить, помещают на предметный столик *18*. Вращением микрометрических винтов *2* или *3* можно передвигать верхнюю плиту столика *18* в одном из двух взаимно перпендикулярных направлениях. Это дает возможность осмотреть под микроскопом поверхность испытуемого объекта и выбрать на ней участок для вдавливания индентора. Длина хода столика в каждом направлении составляет  $10 - 12$  мм. Цена деления шкалы на микрометрических винтах равна  $0,01$  мм.

Кроме того, столик прибора можно поворачивать вокруг вертикальной оси *О-О*, отстоящей на одинаковых расстояниях от оптической оси микроскопа и оси индентора (рис. 6.38).

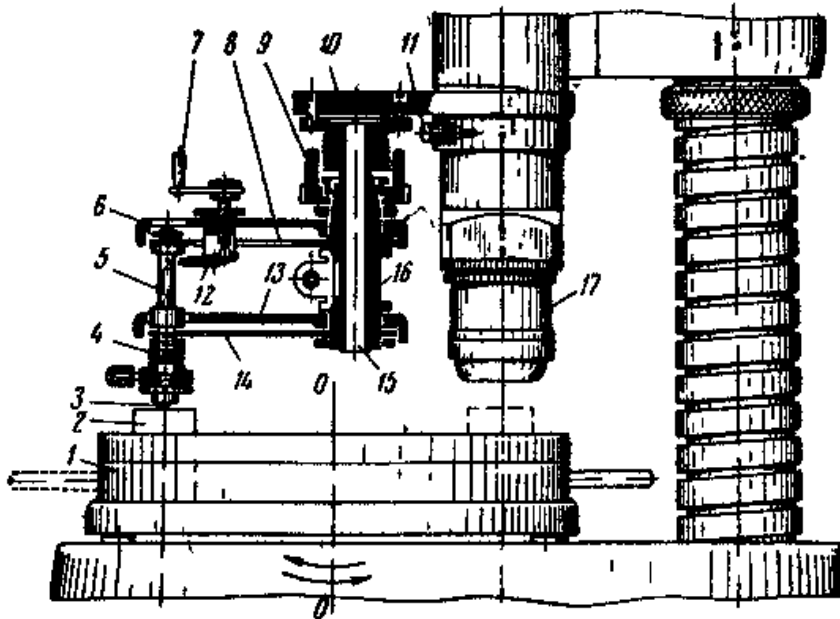


Рис. 6.38 Схема нагружающего устройства

Угол поворота столика равен примерно  $180^\circ$  и ограничивается упорами. Нагружающее устройство крепится к тубусу микроскопа планкой 10, несущей полый стержень 15. Гайкой 9 на стержне удерживается гильза 16, на которой защемлены две плоские стальные пружины 8 и 14. Свободные концы пружин поддерживают шток 5, в патроне 4 которого помещен алмазный индентор 3. Пружины очень чувствительны к нагрузке; под действием груза в 0,001 Н (0,1 г) шток опускается на 0,006-0,007 мм. Сверху пружины закрыты щитками 6 и 13. В верхнем щитке расположен арретир 12, поворот рукоятки 7 которого примерно на треть оборота поднимает или опускает шток на 1 мм (в нерабочем положении шток поднят, его опускают только во время вдавливания). Прибор снабжен набором грузов в форме шайб с радиальной прорезью, которые помещают на буртике в средней части штока 5.

При повороте столика 1 из положения, показанного на рис. 6.38, в направлении против часовой стрелки до упора наблюдаемая точка объекта испытания 2, находящаяся на оси вдавливания алмазной пирамиды 3, перемещается в центр поля зрения микроскопа 17, как показано пунктиром. При повороте столика в обратном направлении до упора указанная точка возвращается в прежнее положение; из этого следует, что вдавливание индентора можно проводить точно в выбранном месте.

При испытании на микротвердость исследуемый объект помещают под объектив микроскопа. Сфокусировав микроскоп на резкость изображения, осматривают и выбирают участок для определения микротвердости. Поворотом столика подводят это место под индентор. После вдавливания индентора столик поворачивают в обратном направлении и измеряют диагонали отпечатка окуляр-микрометром.

Точное совпадение отпечатка с полем зрения микроскопа обеспечивается регулировкой положения объектива винтами 11, перемещающими нижнюю часть микроскопа.

Измерение микротвердости проводят на специально подготовленных образцах – шлифах. Шлиф представляет собой образец, вырезанный в меридиональном сечении обработанной детали (рис. 6.39).

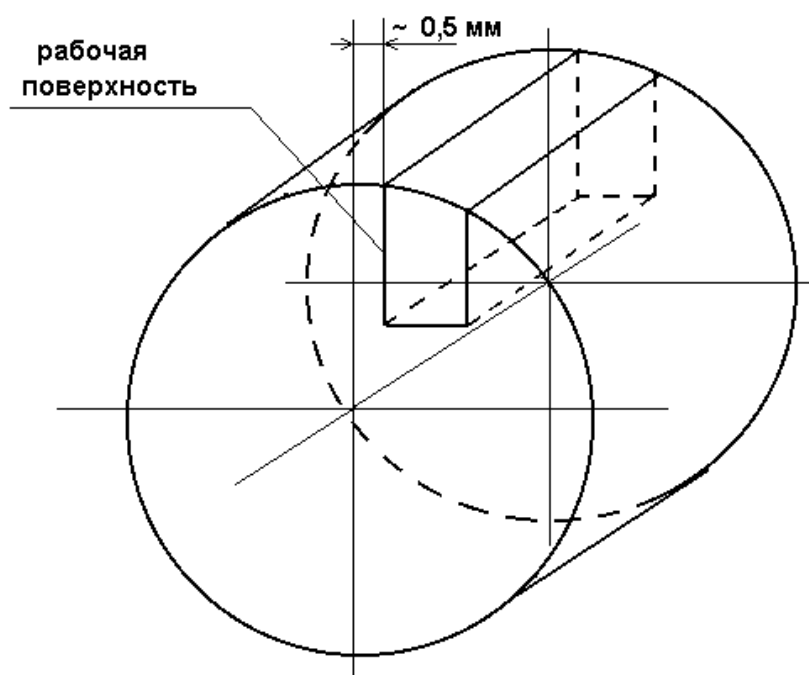


Рис. 6.39 Схема вырезки шлифа

На рабочей (исследуемой) поверхности шлифа оставляется припуск  $z_{\min} \approx 0,5$  мм для обработки до зеркального состояния ( $Ra \leq 0,05$ ). Целью обработки является удаление дефектного слоя, образывающегося на операциях вырезки и шлифования, с исследуемой поверхности шлифа.

После вырезки шлиф устанавливается в металлическое кольцо на стекло исследуемой поверхностью вниз и заливается самотвердеющей пластмассой типа «протакрил» для предотвращения «заваливания» краев при последующем шлифовании и полировании (рис. 6.40).

Шлифование и полирование проводят на специальных станках (например, двухшпиндельном многопозиционном станке модели ЗЕ881М) в следующей последовательности.

1. Шлифование на шкурках шлифовальных тканевых зернистостью 160–100 ГОСТ 13344-79 или ГОСТ 5009-82. При шлифовании следят за постоянством усилия, предотвращая тем самым заметный нагрев шлифуемой поверхности.

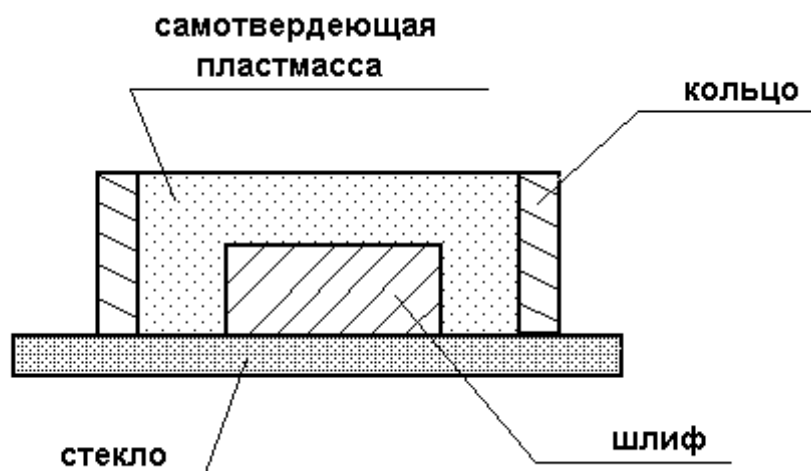


Рис. 6.40 Схема заливки шлифа самотвердеющей пластмассой

2. Шлифование на шкурках шлифовальных тканевых зернистостью 63–50. При каждом переходе на следующий номер шкурки с меньшей зернистостью образец поворачивают таким образом, чтобы новые, более тонкие царапины пересекали царапины от предшествующей обработки под прямым углом. Переход на следующий номер шкурки возможен лишь тогда, когда полностью уничтожены следы обработки на предыдущем номере.

3. Многократное шлифование на шкурках шлифовальных тканевых М63-М40.

4. Последовательное полирование с применением алмазных или эльборовых паст, зернистость которых уменьшается на каждом следующем переходе полирования в последовательности М63/М50, М40/М28, М28/М20, М14/М10, М7/М5.

5. Полирование на сукне с жидкой двуокисью хрома, разведенной в соотношении 1/10...1/7 с водой.

6. Промывание водой, а затем спиртом, просушивание фильтровальной бумагой.

Поверхность образца, подготовленного к окончательному полированию, должна быть покрыта тонкими параллельными штрихами и свободна от грубых царапин.

Шероховатость обработки при шлифовании составляет  $Ra$  0,4 ... 0,2 (при исходной шероховатости  $Rz$  20 ...  $Ra$  2,5). Шероховатость обработки при полировании составляет  $Rz$  0,1 ... 0,05 (при исходной шероховатости  $Ra$  0,4 ... 0,2).

При измерении микротвердости образец устанавливают на предметный столик прибора полированной плоскостью вверх так, чтобы испытываемая поверхность была строго перпендикулярна к направлению перемещения алмазной пирамиды при вдавливании.

При измерении горизонтальной диагонали полученного отпечатка окуляр-микрометром по первому способу перекрестие должно двигаться точно вдоль измеряемой диагонали. Вращением барабана окуляр-микрометра подводят правый угол перекрестия к левому углу отпечатка (рис. 6.41, *а*). Производят первый отсчет показаний шкалы и измерительного барабана окуляр-микрометра. Далее вращением барабана окуляр-микрометра левый угол нитей подводят к правому углу отпечатка (рис. 6.41, *б*) и производят второй отсчет показаний шкалы и измерительного барабана окуляр-микрометра аналогично первому отсчету. Определяют разность показаний при измерении горизонтальной диагонали отпечатка как  $Z_G = Z_1 - Z_2$ . Аналогично выполняют измерение вертикальной диагонали  $Z_B$ , для чего поворачивают окуляр-микрометр относительно своей оси на  $90^\circ$ . Исходя из среднего значения показаний прибора  $\bar{Z}$  определяют длину диагонали отпечатка как  $\bar{D} = \bar{Z} \cdot q$ , где  $q = 0,31$  мкм – цена деления барабана.

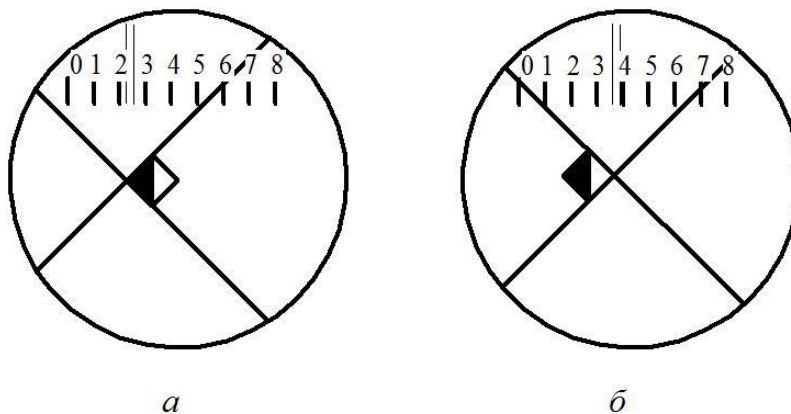


Рис. 6.41 Схема измерения диагоналей отпечатка по первому способу

Перемещая предметный столик на требуемую глубину от поверхности  $h$  от первого отпечатка, выполняют новое измерение микротвердости на выбранной глубине. Последовательно перемещая образец на требуемое расстояние производят замеры микротвердости до тех пор, пока три последовательных значения  $\bar{Z}$  не будут равны между собой. Рассчитывают микротвердость для каждого отпечатка и строят

кривую распределения микротвердости по глубине поверхностного слоя, откладывая по оси абсцисс глубину расположения отпечатка  $h$ , а по оси ординат – величину микротвердости  $HV$ . По распределению микротвердости определяют параметры упрочнения.

При измерении диагонали полученного отпечатка окуляр-микрометром по второму способу перекрестие движется по биссектрисе угла между диагоналями. Последовательность работ показана на рис. 6.42, *а, б, в, г*.

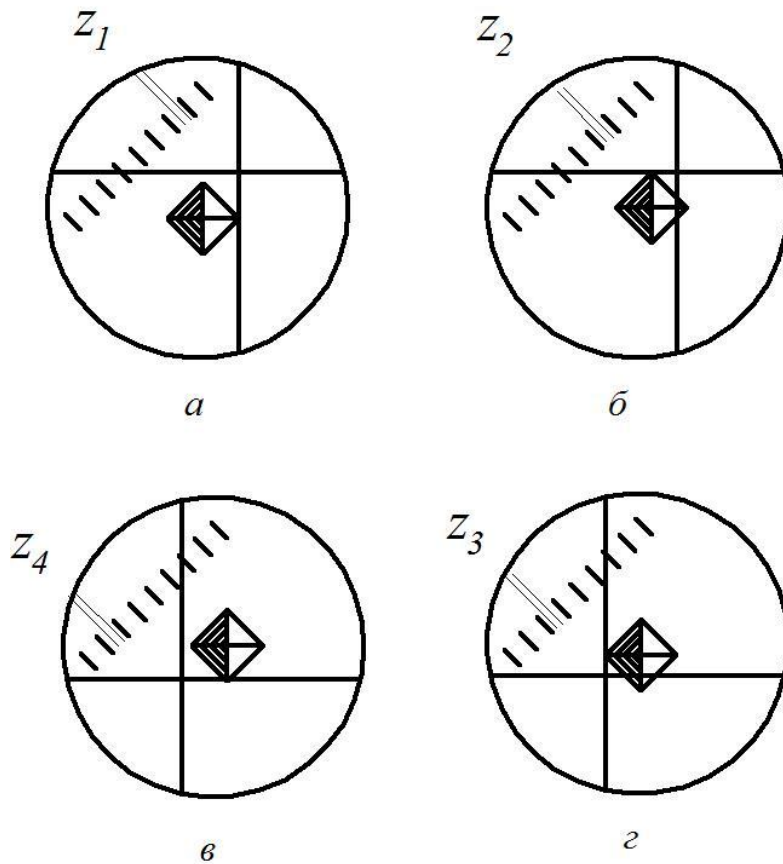


Рис. 6.42 Схема измерения диагоналей отпечатка по второму способу

В ряде случаев глубина упрочненного слоя сопоставима с размерами диагонали отпечатка алмазной пирамиды. Тогда используют методику так называемого «косого среза».

Изготовление среза для измерения микротвердости выполняется в две операции. На первой операции производится фрезерование плоскостей среза, на второй – шлифование на плоскошлифовальном станке. Шлифование осуществляется при обиль-

ном охлаждении рабочей зоны для исключения значительного искажения структуры поверхностного слоя.

Косой срез выполняется под некоторым углом  $\alpha$  в зависимости от предполагаемой глубины упрочнения.

Для установки и закрепления образца на приборе используется специальное приспособление, обеспечивающее перпендикулярность индентора плоскости измерения (рис. 6.43). Приспособление устанавливается на предметном столике, снабженном микрометрическими винтами для перемещения его в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Предметный столик с помощью специального переходника закрепляется на столе прибора ПМТ-3.

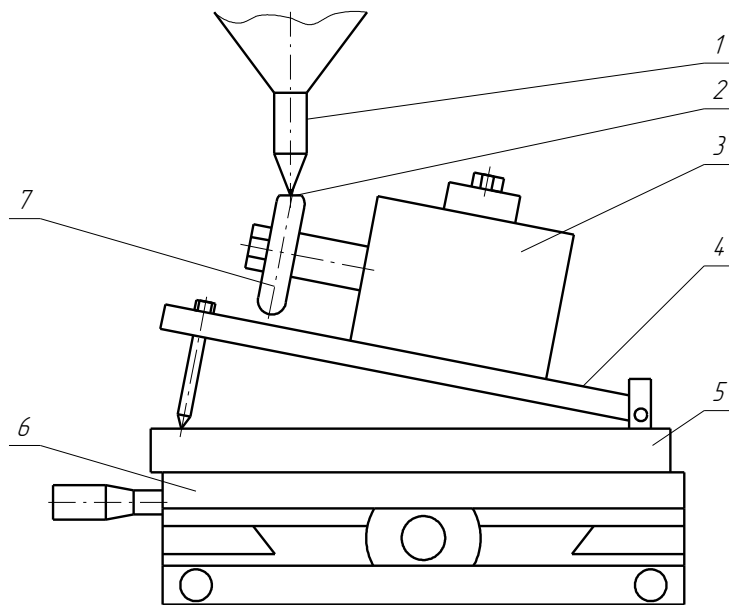


Рис. 6.43 Приспособление для измерения микротвердости методом косого среза: 1 – индентор; 2 – косой срез; 3 – корпус; 4 – наклонная плита; 5 – основание; 6 – подвижный стол; 7 – образец

Глубину  $h$  расположения каждого отпечатка определяют по формуле

$$h_i = R - \sqrt{R^2 + a_i} - a_i \cdot l,$$

где  $i=1, 2, 3, \dots$  – номер отпечатка;  $R$  – радиус образца (измеряется микрометром);  $l$  – ширина среза, измеряется на приборе ПМТ-3 путем перемещения столика и совмещения перекрестья

сначала с одним, а затем с другим краем плоскости среза;  $a$  – расстояние отпечатка от края среза.

Наряду с микротвердостью в инженерной практике широко используется *метод твердости по Виккерсу*.

Прибор 2137 ТУ служит для измерения твердости металлов и сплавов по методам Виккерса и Бринелля. Испытательные нагрузки составляют от 5 до 250 кгс. Принцип работы па данном приборе аналогичен прибору ПМТ-3.

В этом случае также измеряют диагонали отпечатков, образуемых индентором с четырехгранной пирамидой с углом при вершине  $\alpha=136^\circ$ , строят кривые распределения твердости в координатах  $h - HV$ , по которым и определяют параметры упрочнения.

## 6.7 Остаточные напряжения

### 6.7.1 Параметры остаточных напряжений

Как было отмечено, остаточные напряжения – это упругие напряжения, которые остались в детали после обработки. В зависимости от объемов тела, в которых рассчитывают остаточные напряжения (ОН), они условно подразделяются на напряжения первого рода  $\sigma'_{\text{ост}}$ , второго рода  $\sigma''_{\text{ост}}$  и третьего рода  $\sigma'''_{\text{ост}}$ .

*Макронапряжения* или напряжения первого рода уравниваются в макрообъемах, соизмеримых с размерами детали. В этих объемах материал рассматривается как изотропный.

*Микронапряжения* или напряжения второго рода распространяются в микрообъемах, соизмеримых с размерами зерен, блоков, групп зерен. Их появление вызывается анизотропией кристаллов, ориентацией кристаллографических плоскостей, наличием различных фаз, дислокаций, взаимодействием соседних зерен между собой. Если соседние зерна представляют собой различные фазы с разными механическими и физическими свойствами, то при деформации или изменении температуры возникают межфазные микронапряжения. Причиной межфазных температурных напряжений является различие коэффициентов линейного расширения этих фаз вдоль разных кристаллографических направлений.



Название *субмикронапряжения* или напряжения третьего рода применяют условно, так как имеются в виду не напряжения, а статические смещения атомов из узлов решетки, вызванные точечными дефектами.

Источником возникновения ОН являются микронапряжения, возникшие в кристаллической структуре в результате пластического течения металла, нагрева и фазовых превращений. Сумма проекций сил, возникших в кристаллической структуре металла, образует объемные силы – остаточные напряжения 1-го рода, которые рассматриваются в качестве одного из параметров механического состояния поверхностного слоя.

В зависимости от характера и интенсивности физико-механических процессов, происходящих при обработке, ОН могут иметь различный знак. В связи с этим различают сжимающие (-) и растягивающие (+) ОН. Остаточные напряжения – это тензор, поэтому они могут быть спроектированы на любые оси заданной системы координат [14].

Условия равновесия требуют, чтобы в объеме тела сумма проекций всех сил была равна нулю. Поэтому в детали всегда есть области со сжимающими и растягивающими ОН. Однако при исследовании ОН ограничиваются построением эпюр ОН только в поверхностном слое.

Обобщенно можно сказать, что ОН 1-го рода возникают или как результат неравномерных пластических деформаций и последующей разгрузки или неравномерного нагрева и охлаждения различных слоев детали или как результат того и другого. Остаточные напряжения имеют место практически в любых твердых телах. В одних случаях напряжения настолько малы, что ими можно пренебречь; в других случаях не принимать их во внимание нельзя.

Остаточные напряжения 1-го рода определяются экспериментальными методами, среди которых наибольшее применение нашли методы послойного травления и рентгеноструктурного анализа. По результатам эксперимента строят эпюры ОН в различных сечениях тела, например, в осевом и тангенциальном сечениях вала. По ним определяют глубину залегания  $h_{\sigma}$ , величину ОН на поверхности  $\sigma_{ост}^0$ , подслоный максимум  $\sigma_{ост}^{max}$  или минимум  $\sigma_{ост}^{min}$  сжимающих

остаточных напряжений и другие характерные точки (рис. 6.44). Особенности механических, тепловых и структурно-фазовых процессов, происходящих при обработке, могут привести к появлению подслоного минимума сжимающих напряжений  $\sigma_{\text{ост}}^{\text{min}}$  (см. штриховую кривую 1 на рис. 6.44) или к отсутствию подслоных экстремумов (см. штриховую кривую 2).

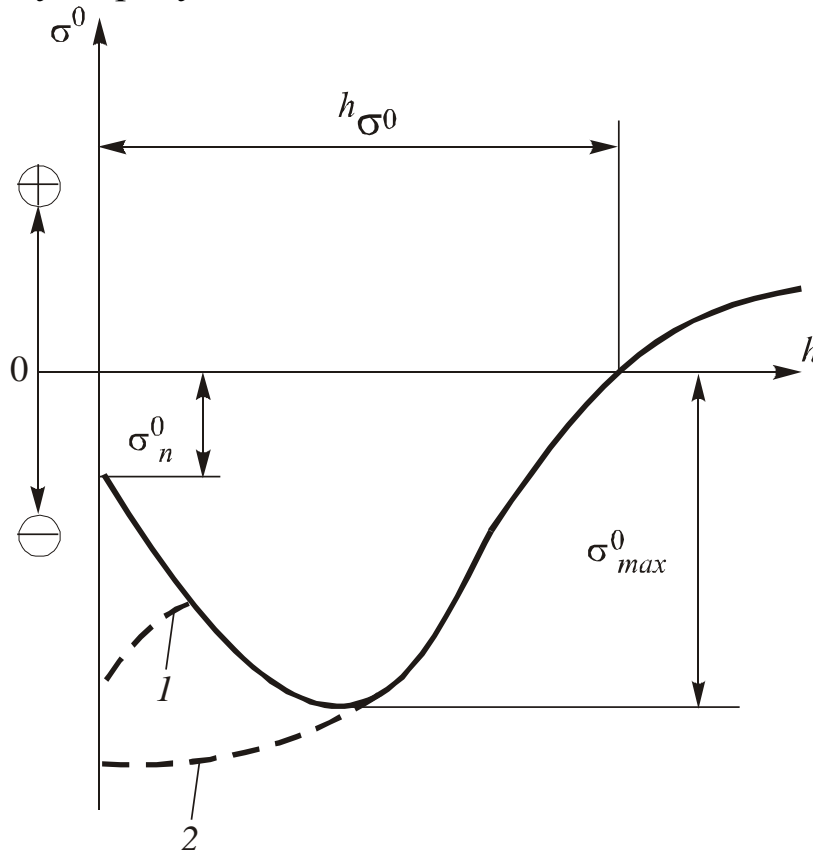


Рис. 6.44 Пример эпюры остаточных напряжений

Следует отметить, что глубина наклепа не равна глубине распространения сжимающих остаточных напряжений. Кроме того, экспериментальное значение  $h\sigma_0$  зависит от метода измерения и его точности.

Сложное взаимодействие механических и тепловых процессов, происходящих в зоне контакта инструмента с деталью, может привести к возникновению в поверхностном слое различных по характеру эпюр ОН.

Предметом научных споров является причина образования максимума ОН на поверхности или на некотором удалении от нее (см. кривые 1 и 2 на рис. 6.44).

Существуют различные точки зрения на причины этого явления:

- смещение максимума ОН в глубину объясняют перенаклепом металла в слое, примыкающем к поверхности детали;
- спад ОН объясняют характером распределения касательных напряжений, в соответствии с которым максимальные значения этих напряжений находятся на некотором расстоянии в зоне глубинной текучести;
- причиной спада ОН является температура, возникающая в поверхностном слое при обработке детали. Тепловые напряжения увеличиваются с увеличением силы обработки и, суммируясь с механическими напряжениями, формируют суммарную эпюру ОН;
- в ряде случаев спад объясняют градиентом плотности поверхностного слоя и др.

По мнению проф. А. Н. Овсеенко, остаточными напряжениями называются такие напряжения, которые существуют и взаимно уравниваются внутри твердого тела после устранения причин, вызвавших их появление [8]. Другими словами, остаточные напряжения – это напряжения в свободном от внешних нагрузок и воздействий теле.

Остаточные напряжения взаимно уравновешены в объеме детали, их главный вектор и главный момент по сечению детали равны нулю (рис. 6.45):

$$\left\{ \begin{array}{l} \int_F \sigma_0(x) dF = 0 \\ \int_F \sigma_0(x)x dF = 0 \\ \int_F \tau_0(x) dF = 0 \\ \int_F \tau_0(x)x dF = 0 \end{array} \right. ,$$

где  $F$  – площадь сечения детали;  $\sigma_0(x)$  – нормальные остаточные напряжения в сечении детали;  $\tau_0(x)$  – остаточные касательные напряжения в сечении детали;  $x$  – текущая координата по сечению детали.

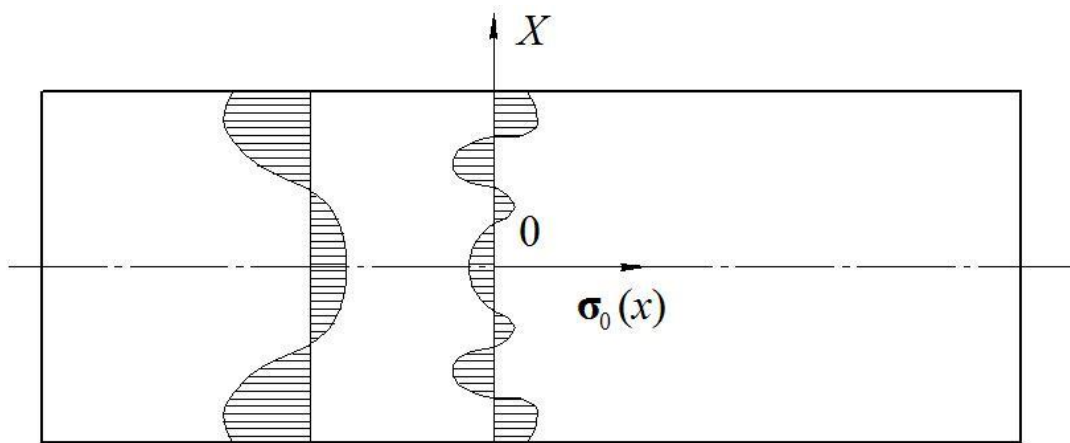


Рис. 6.45 Схема эпюр нормальных остаточных напряжений по сечению детали

По мнению проф. А. Н. Овсенко, напряжения в детали после обработки, но до ее деформации, называются *технологическими начальными напряжениями*. Другими словами, если детали, получившей после обработки остаточные деформации, приложением соответствующей системы внешних нагрузок придать исходное (недеформированное) состояние, то напряжения в детали будут соответствовать тем начальным напряжениям, которые вызвали ее технологические остаточные деформации. Начальные напряжения, как правило, не уравновешены в объеме детали. В закрепленном состоянии детали эта неуравновешенность полностью или частично компенсируется внешними связями (например, магнитными плитами, зажимами приспособлений и т.п.).

Теоретически напряженное состояние ПС, образующегося при механической обработке, является объемным и может быть оценено тремя нормальными и тремя касательными напряжениями. Направления осей, по которым определяют эти напряжения, обычно выбирают в зависимости от траектории движения инструмента при обработке (формообразующих движений) и дают им соответствующие названия и обозначения. Например, для тела вращения используют понятия нормальных напряжений (рис. 6.46):

- осевых  $\sigma_{\text{ост}}^0$ , рассматриваемых в направлении подачи;
- окружных (тангенциальных)  $\sigma_{\text{ост}}^r$ , рассматриваемых в направлении вектора скорости резания или пластического деформирования;

- радиальных  $\sigma'_{ост}$ , рассматриваемых перпендикулярно обработанной поверхности.

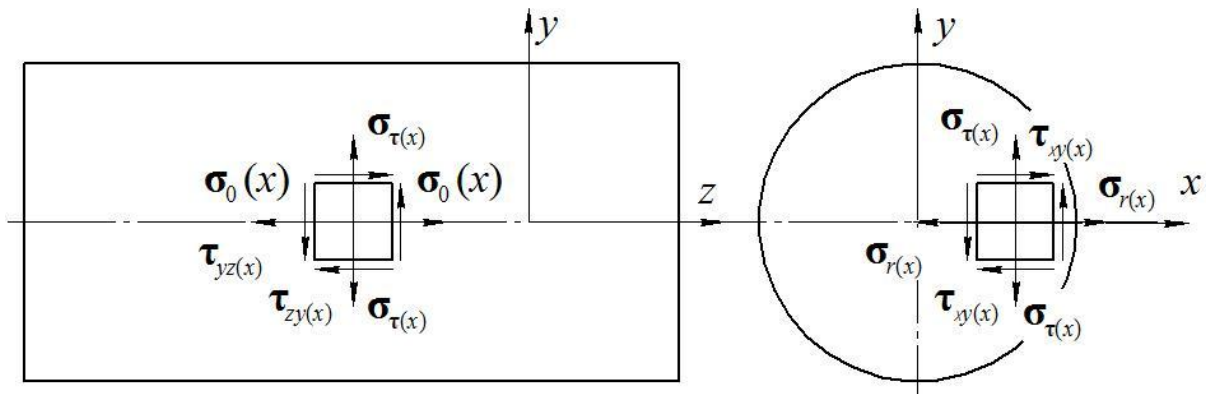


Рис. 6.46 Схема остаточных напряжений в поверхностном слое детали

### 6.7.2 Методы определения остаточных напряжений

Существующие методы определения остаточных напряжений можно разделить на механические, физические и химические, осуществляемые с разрушением или без разрушения детали.

*Механические разрушающие методы* достаточно хорошо разработаны и получили наибольшее распространение. Они базируются на теоретических положениях о напряжениях и деформациях механики твердого тела. Механические методы могут быть теоретическими и экспериментальными.

*Теоретические методы* находятся в стадии разработки и в большинстве случаев не позволяют с необходимой точностью определять остаточные напряжения для реальных условий обработки. Трудности разработки теоретических методов расчета начальных и остаточных напряжений связаны с тем, что напряжения формируются в результате сложных процессов упругопластических, термопластических деформаций ПС, фазово-структурных превращений, химических реакций и процессов релаксации.

К числу наиболее развитых в инженерном отношении можно отнести теоретический аппарат расчета остаточных напряжений при обработке ППД, предложенный В. М. Смелянским [14]. Расчет остаточных напряжений проводится с учетом накоплен-

ных деформаций на основе использования параметров напряженного состояния. Согласно теореме о разгрузке тензор остаточных напряжений после разгрузки составляет:

$$[(T\sigma)_{\text{ост}}]_{ij} = [(T\sigma)_{\text{деф}}]_{ij} + [(T\sigma)_{\text{раз}}]_{ij},$$

где  $[(T\sigma)_{\text{деф}}]_{ij}$  – тензор напряжений под нагрузкой;  $[(T\sigma)_{\text{раз}}]_{ij}$  – тензор напряжений упругой разгрузки, соответствующей силам, имеющим место до разгрузки.

Напряжения упругой разгрузки – это упругие напряжения от механических сил и упругие тепловые напряжения разгрузки. Однако эти два вида напряжений разгрузки действуют в точке не одновременно, поэтому можно записать:

$$[(T\sigma)_{\text{ост}}]_{ij} = [(T\sigma)_{\text{деф}}]_{ij} + [(T\sigma)_{\text{раз}}]_{ij} + [(T\sigma)_{t^0}]_{ij},$$

где  $[(T\sigma)_{t^0}]_{ij}$  – упругие тепловые напряжения разгрузки.

Пластические напряжения определяются путем решения задачи механики пластического деформирования. При расчете упругих напряжений также решается задача теории упругости. В соответствии с теоремой о разгрузке упругое разгрузочное поле при определении остаточных напряжений характеризует поле, возникающее при приложении равной по величине, но обратной по знаку силы, вызывающей пластические деформации. Упругие тепловые напряжения разгрузки определяются путем решения соответствующей задачи, исходя из представлений о закономерностях накопления тепла.

В итоге получают тензор, учитывающий распределение нормальных и касательных компонент остаточных напряжений.

При использовании *механических экспериментальных методов* остаточные напряжения определяются по деформациям, возникающим в результате нарушения равновесия остаточных напряжений, которые возникают от разрезки детали, вырезки из нее образцов и послойного удаления напряженных слоев.

Методика определения остаточных напряжений в деталях типа пластин заключается в том, что с поверхности детали в двух взаимно перпендикулярных направлениях вырезаются призматические образцы прямоугольного сечения длиной  $l$ , шириной  $b$  и толщиной  $b$ . Толщина образца должна более чем в 3 раза превышать глубину исследуемого напряженного слоя  $a$ . Ширину образца берут обычно от

5 до 10 мм. Процесс вырезки не должен сопровождаться высокими температурами и вибрациями, которые смогли бы повлиять на остаточные напряжения в образцах. В результате вырезки нарушается равновесие остаточных напряжений в образце, возникает изгибающий момент и продольная сила, которые вызовут изгиб образца  $f_0$  и его удлинение или укорочение  $\Delta l$  (в зависимости от знака остаточных напряжений в ПС). Если после вырезки образец изгибается выпуклостью в сторону напряженного ПС, это значит, что в нем имелись и частично сняты сжимающие, при изгибе в обратном направлении – растягивающие остаточные напряжения.

Аналогично изгибу удлинение сопровождается уменьшением сжимающих и увеличением растягивающих остаточных напряжений растяжений и наоборот.

Для определения остаточных напряжений в цилиндрических деталях из них вырезают, как правило, кольцевые образцы и образцы вдоль оси. При этом, чтобы образец можно было считать призматическим, его ширина ограничивается соотношением  $h < 0,4\sqrt{R \cdot b}$ , где  $R$  – радиус кривизны наружной поверхности образца,  $b$  – толщина образца. Ширина кольцевого образца может быть равной  $(4...6)b$ , длина продольного образца –  $l=50...100$  мм. После вырезки кольцевые образцы разрезаются по образующей, и измеряется изменение их диаметра по сравнению с начальным.

Сжимающие остаточные напряжения в наружном поверхностном слое приведут к уменьшению диаметра кольцевого образца (уменьшению ширины прорези), а растягивающие – к его увеличению.

Дальнейшее определение остаточных напряжений в вырезанных образцах производится в специальных установках. Наиболее широкое применение нашли приборы типа ПИОН (прибор измерения остаточных напряжений), в которых образец закрепляется в приспособлении (рис. 6.47) [15-16].

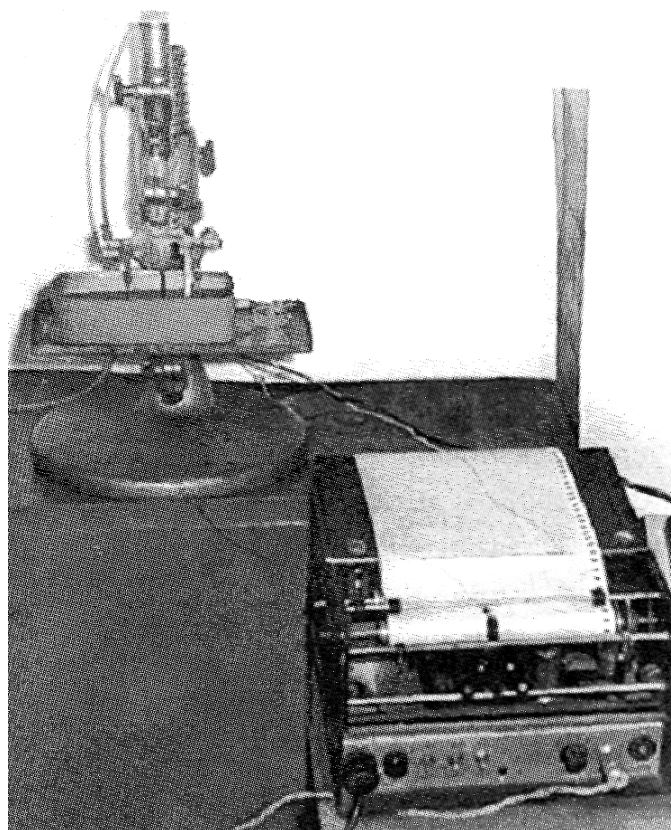


Рис. 6.47 Общий вид прибора «ПИОН»

Все поверхности приспособления и образца, кроме исследуемой, покрываются защитным лаком или тонким слоем воска. Путем электрохимического или химического травления производится непрерывное удаление напряженных поверхностных слоев и одновременная регистрация деформаций изгиба образца или изменения его диаметра. Для точного измерения перемещений и деформаций применяют индикаторные, оптические приборы, тензометрию, индуктивные и токовихревые датчики, механотроны, голографическую технику, хрупкие покрытия и др. Состав ванны, скорость травления, плотность тока и другие параметры для травления подбираются с учетом химического состава и свойств исследуемого металла.

Остаточные напряжения в образцах с учетом вырезки и разрезки (кольцевого образца) находятся на основе принципа суперпозиции [15]:

$$\sigma_{\tau}(a) = \sigma_{\tau}^o + \sigma_{\tau}^B; \quad \sigma_o(a) = \sigma_o^o(a) + \sigma_o^B(a),$$



где:  $\sigma_{\tau}^0(a)$ ,  $\sigma_{\tau}^B(a)$  – остаточные напряжения в вырезанном кольцевом и продольном образце соответственно;  $\sigma_{\tau}^0(a)$ ,  $\sigma_{\tau}^B(a)$  – изменение остаточных напряжений в кольцевом и продольном образце соответственно в результате их вырезки из детали и разрезки (кольцевого образца).

Для тангенциальных остаточных напряжений (кольцевого образца):

$$\sigma_{\tau}^o(a) = \frac{E}{3} \frac{(\delta - a)}{(D \pm a)^2} \left[ (\delta - a) \frac{df(a)}{da} - 2 \left( 2 + \frac{\delta - a}{D \pm a} \right) f(a) + 2 \int_0^a f(\xi) \frac{d\xi}{(D \pm \xi)^2} \right],$$

$$\sigma_{\tau}^e(a) = E \frac{\Delta D_p}{D^2} (\delta - 2a) - E \frac{\Delta D_g}{D},$$

где  $a$  – расстояние рассматриваемого слоя от поверхности образца;  $D$  – средний диаметр кольца до удаления слоя « $a$ »;  $\Delta D_g$  – изменение среднего диаметра кольца после его вырезки из детали;  $\Delta D_p$  – изменение среднего диаметра кольца после его разрезки;  $\delta$  – начальная толщина его кольца;  $f(a)$  – изменение среднего диаметра кольца после снятия слоя толщиной « $a$ »;  $f(\xi)$  – функция изменения среднего диаметра кольца по текущей координате « $\xi$ » слоя  $d\xi$  от наружной (или внутренней) поверхности;  $df(a)/da$  – первая производная функции изменения диаметра кольца по толщине снятого слоя « $a$ ». Знак (+) в формуле берется для случая расчета остаточных напряжений в ПС отверстий, знак (–) – для наружной поверхности колец.

По аналогии определяются осевые и тангенциальные остаточные напряжения в образце прямоугольного сечения.

Исходные остаточные напряжения осевые  $\sigma_0(a)$  и тангенциальные  $\sigma_{\tau}(a)$  в детали рассчитываются по формулам:

$$\sigma_0(a) = \frac{1}{1 - \mu^2} [\sigma_0(a) + \mu \sigma_{\tau}(a)];$$

$$\sigma_{\tau}(a) = \frac{1}{1 - \mu^2} [\sigma_{\tau}(a) + \mu \sigma_0(a)],$$

где  $\mu = 0,3$  – коэффициент Пуассона (для конструкционных сталей).

Кроме того, в промышленности используется проблемно-ориентированный измерительно-вычислительный комплекс контроля остаточных напряжений (ПОВКОН) «Тензор», имеющий прямую связь с ПК (рис. 6.48) [16].

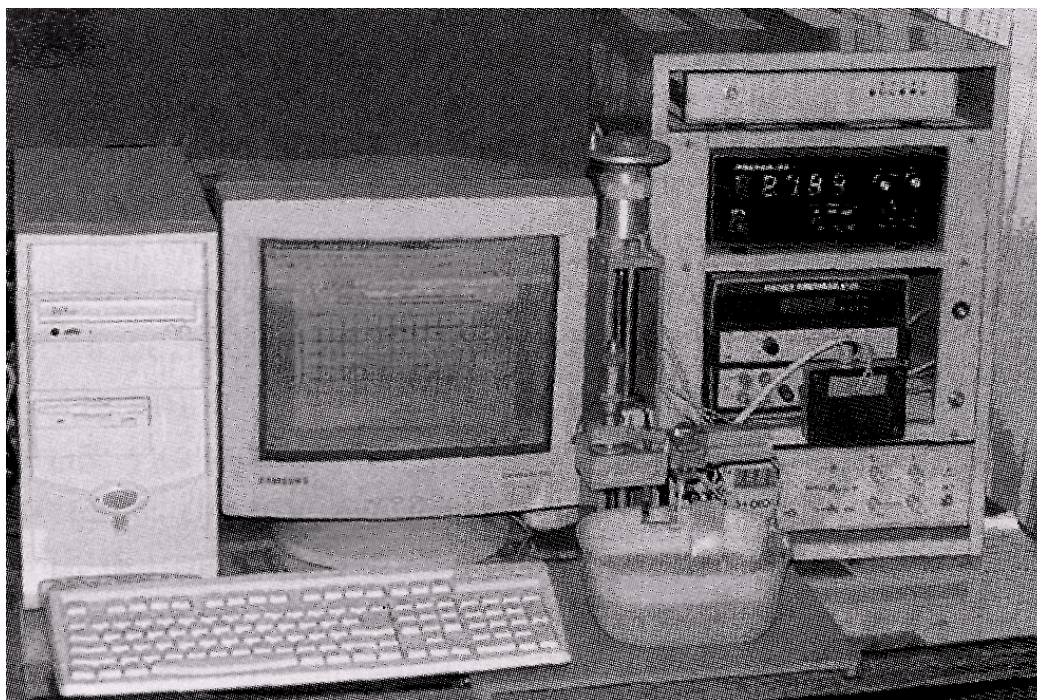


Рис. 6.48 Общий вид установки ПОВКОН «Тензор»

В настоящее время разработаны и изготовлены приборы нового поколения для кулонометрического измерения остаточных напряжений МерКулОН «Тензор 3» (рис. 6.49).

К *физическим методам* определения остаточных напряжений относят: рентгеновский метод; методы, основанные на изменении магнитных шумов Баркгаузена; метод амплитудно-фазово-частотных характеристик; методы, основанные на изменении электромагнитных свойств металла под действием напряжений; метод, основанный на изменении ядерного гамма-резонанса (эффект Мессбауэра); ультразвуковые методы; метод индикатора; поляризационно-оптические методы, метод магнитной памяти и др.

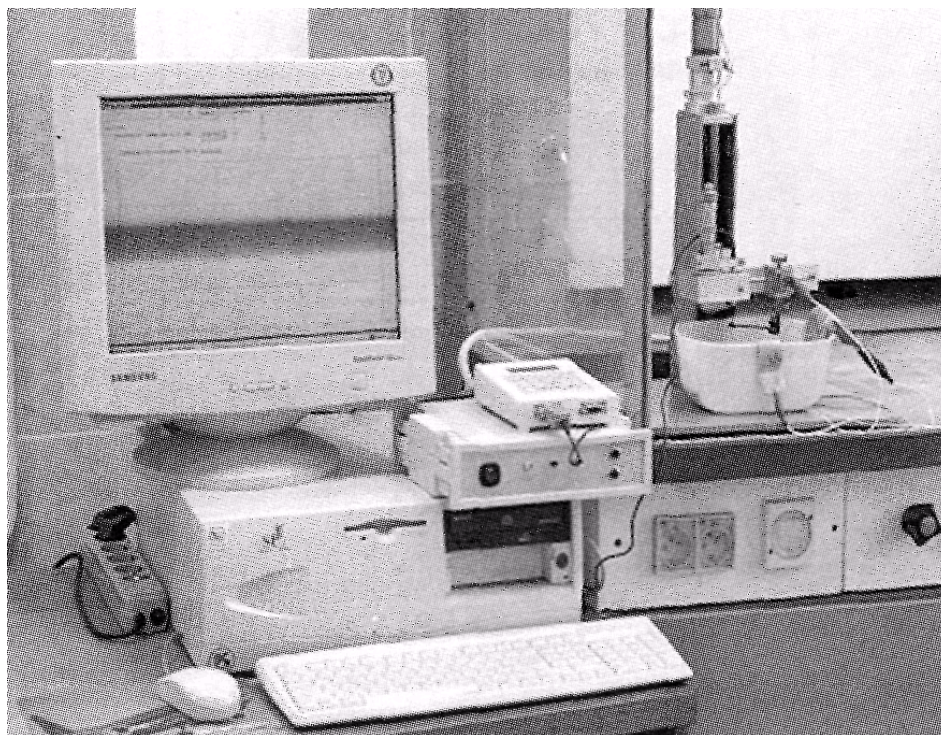


Рис. 6.49 Общий вид установки МерКулОн «Тензор-3»

*Рентгеновский метод* основан на измерении деформаций кристаллической решетки под действием напряжений. Напряжения 1-го рода определенным образом ориентированы на поверхности детали и вызывают несимметричное изменение межплоскостного (межатомного) расстояния от  $d_0$  по  $d_0 + \Delta d$ . Это приводит к угловому отклонению лучей, отраженных от определенных кристаллографических плоскостей металла ПС, которое проявляется в смещении линий на рентгенограммах или дифрактограммах. Исследование выполняется методом двух угловых съемок (ненапряженного и напряженного металла), по результатам которых определяют угол смещения дифракционной линии (кристаллографических плоскостей)

$$\Delta\theta = -\frac{\Delta d}{d_0} \operatorname{tg}\theta_0 = -\varepsilon \operatorname{tg}\theta_0,$$

где  $\theta_0$  - дифракционный угол, соответствующий состоянию металла без напряжений;  $\varepsilon$  – относительная деформация решетки.

Деформация  $\varepsilon$  измеряется вдоль нескольких направлений под различными углами с нормалью к поверхности образца. По

измеренным относительным деформациям  $\varepsilon$  рассчитывают главные напряжения  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$  в тонком поверхностном слое.

При этом необходимо иметь ввиду, что луч проникает в металл на глубину от 15 до 20 мкм, т.е. на рентгенограммах и дифрактограммах отражается картина усредненных по некоторой глубине напряжений. Кроме того, металл ПС обладает анизотропией механических и физических свойств, а его модуль упругости может существенно отличаться от модуля упругости основного металла. Для определения распределения остаточных напряжений по глубине необходимо послойное травление и снятие рентгенограмм (дифрактограмм).

Таким образом, в качестве неразрушающего рентгеновский метод можно использовать только для определения остаточных напряжений в тонком ПС. Его целесообразно применять для оценки напряжений в деталях малых размеров или сложной формы. Максимальная точность определения напряжений рентгеновским методом  $\pm 20$  МПа (на отожженной мягкой стали).

*Эффект Баркгаузена* – это скачкообразное изменение намагниченности ферромагнитных материалов при непрерывном изменении внешнего магнитного поля. Ферромагнитные материалы состоят из небольших намагниченных областей, названных магнитными доменами. Объем магнитных доменов у большинства ферромагнитных материалов составляет  $10^{-3}$ - $10^{-6}$  мм<sup>3</sup> (т.е. линейные размеры 0,1...0,001 мм). Домены отделены друг от друга стенками (границами) и имеют намагниченность вдоль некоторой оси кристаллической решетки, однако магнитный момент всей детали равен нулю. При воздействии на деталь магнитного поля граница доменов начинает перемещаться. Встречая препятствие, она останавливается и некоторое время остается неподвижной, несмотря на дальнейшее увеличение внешнего магнитного поля. При некотором значении магнитного поля граница преодолевает препятствие и перемещается до следующего препятствия без дальнейшего увеличения поля (скачкообразно). Таким образом, кривая намагниченности имеет ступенчатый характер. Скачкообразное изменение намагниченности сопровождается шумовыми сигналами, которые могут быть оценены в зависимости от изменения магнитоупругости материала.

*Шумовые сигналы* при непрерывном изменении намагниченности были обнаружены в 1919 г. физиком Г. Баркгаузеном и названы «эффектом Баркгаузена». Причиной эффекта Баркгаузена являются различные неоднородности в ферромагнитных материалах (инородные включения, дислокации механические, в том числе остаточные напряжения и т.п.), которые препятствуют перестройке магнитной структуры. С помощью эффекта Баркгаузена могут быть определены микротвердость, структура материала, дефекты ПС (прижоги, обезуглероженные области, области на грани разрушения и т.п.), а также остаточные напряжения. Сжимающие напряжения уменьшают амплитуду шумового сигнала, а растягивающие – увеличивают.

Для количественной оценки остаточных напряжений проводится предварительная тарировка прибора на специальном образце, материал которого, его микроструктура, технология изготовления, свойства ПС должны быть такими же, как у исследуемой детали. Толщина ПС, в котором могут быть измерены остаточные напряжения методом шумов Баркгаузена, определяется магнитной проницаемостью исследуемого материала, частотным диапазоном шумового сигнала и находится в пределах от 0,005 до 2,0 мм. Изменяя частоту спектра шумов Баркгаузена можно определить остаточные напряжения на разных глубинах от поверхности. Существующие приборы (типа РМША, Stresscan) позволяют это делать на трех глубинах, выделять и оценивать главные напряжения, исследовать большие поверхности и получать данные о распределении остаточных напряжений по поверхности, выявить участки с недопустимым уровнем напряжений.

*Амплитудно-фазово-частотный метод* определения (тестирования) напряженно-деформированного состояния ПС деталей основан на изменении электрической проводимости материала при изменении его напряженного состояния. Имеется существенная корреляция между площадью эпюры остаточных напряжений и амплитудно-фазово-частотной характеристикой (АФЧХ) ПС с остаточными напряжениями. Остаточные напряжения определяются путем сравнения АФЧХ исследуемой поверхности и эталонного образца с известными остаточными напряжениями.

Прибор АФЧХ-тестирования реализован в виде датчика, содержащего подводящий и отводящий электроды. С выхода датчика снимается величина падения напряжения на исследуемом участке и величина выходного сигнала, которые подаются на приемник измерительных сигналов, соединенных с компьютером. Деформирующая способность (площадь эпюры) остаточных напряжений определяется путем математической обработки результатов, полученных АФЧХ. В основу алгоритма расчета остаточных напряжений положены специальным образом сформированные массивы данных, получаемых по АФЧХ исследуемого участка поверхности детали и дающих возможность оперировать корреляционными связями между остаточными напряжениями, некоторыми физическими свойствами материала исследуемой детали, ее геометрической формой и размерами. Таким образом, после математической обработки, т.е. после пересчета электрических характеристик в площадь участка эпюры остаточных напряжений (деформирующую способность), находятся величина и знак остаточных напряжений на определенной глубине от поверхности. Способ АФЧХ позволяет исследовать напряженно-деформированное состояние металлических деталей с различными электромагнитными свойствами, различной формы и размеров, без специальной подготовки поверхности.

*Эффект Мессбауэра (ядерный гамма-резонанс)* состоит в резонансном поглощении  $\gamma$ -квантов без отдачи. При облучении твердого тела  $\gamma$ -квантами атомное ядро может возбуждаться, т.е. переходить в состояние с большей внутренней энергией. Основные параметры Мессбауэровских спектров зависят от межатомного расстояния, т.е. колебания атомов относительно положения равновесия в кристаллах зависят от напряжений. Площадь спектральных линий уменьшается с увеличением сжимающих напряжений. Для получения Мессбауэровских спектров используют Мессбауэровские спектрометры, в которых в качестве источников  $\gamma$ -квантов применяют радиоактивные изотопы. Методом ядерного гамма-резонанса можно исследовать плоское напряженное состояние с усреднением напряжений по глубине слоя 5...20 мкм. Точность самого метода оценивается величиной  $\pm(0,05...1,25)$  МПа, однако с учетом суммарных погрешностей измерений и усреднения по глубине его точность может находиться в пределах  $\pm 20$  МПа.

## 6.8 Влияние технологических факторов на формирование качества поверхностного слоя деталей машин

Согласно современным представлениям, формирование поверхностного слоя происходит в условиях пластического течения металла в очаге деформации, составляющем небольшую часть объема обрабатываемой детали. Температура частицы металла в очаге деформации зависит от физических и механических свойств материала детали, а также от накопленной пластической деформации. На формирование состояния ПС влияют следующие факторы [3-4, 17-20]:

- физико-химические свойства обрабатываемого и инструментального материала;
- геометрические параметры и состояние режущей (деформирующей) части инструмента;
- технологические режимы обработки;
- жесткость и виброустойчивость технологической системы;
- кинематика процесса обработки, определяющая траекторию движения рабочей части инструмента относительно заготовки;
- смазывающие и охлаждающие технологические среды (СОТС), способы их подачи в зону резания;
- внешние дополнительные воздействия (предварительный или сопутствующий подогрев, глубокое охлаждение, вакуум, электрохимическое, электрофизическое, ультразвуковое) и др.

Формирование ПС при механической обработке происходит в условиях сложного неоднородного напряженно-деформированного состояния металла очага деформации. Пластическое течение металла, трение в зоне контакта с инструментом, высокие скорости деформации приводят к существенным структурным изменениям, затухающим по глубине деформированного поверхностного слоя. Происходит дробление зерен на фрагменты и блоки и их угловая разориентация. У поверхности они измельчаются и вытягиваются в направлении усилия деформирования, образуя текстуру. В атомной решетке возрастает количество дислокаций, вакансий и других дефектов. При пластической деформации до 10 % затраченной энергии поглощается металлом, из которой до 98 % идет на искажение кристаллической решетки, увеличивая скрытую энер-

гию металла. Он становится нестабильным, термодинамически неустойчивым. Существенное тепловыделение, свойственное ряду процессов резания, приводит, в свою очередь, к высоким температурам (до 1000 °С). Выделение тепла в очаге деформации может вызвать отдых, полигонизацию и рекристаллизацию металла деформированного ПС, т.е. его разупрочнение. Происходит уменьшение плотности дислокаций, их перераспределение в термодинамически более устойчивые структуры с минимумом накопленной энергии и с аннигиляцией части дислокаций, участие дислокаций в фазовых превращениях с изменением структуры, размера и распределения фаз. Конечное состояние ПС определяется степенью влияния процессов упрочнения и разупрочнения.

#### 6.8.1 Влияние технологических факторов на шероховатость поверхности

Микрогеометрию обработанной поверхности рассматривают в направлении подачи инструмента (поперечная шероховатость) и направлении скорости резания (продольная шероховатость).

В большинстве случаев поперечная шероховатость больше продольной, хотя при малых подачах и скоростях резания может наблюдаться обратное соотношение [3, 17].

В науке о резании металлов высота микронеровностей представляется в виде двух слагаемых :

$$Rz = Rz_p + Rz_\phi,$$

где  $Rz_p$  – расчетная высота шероховатости, определяемая геометрическими факторами;  $Rz_\phi$  – высота шероховатости, зависящая от физических процессов в зоне формирования ПС.

Расчетная высота шероховатости  $Rz_p$  может быть определена как высота остаточного гребешка на обработанной поверхности (рис. 6.50).

При фрезеровании цилиндрической, дисковой или концевой фрезой

$$Rz_p = R - \frac{1}{2} \sqrt{4R^2 - S_z^2} \approx \frac{S_z^2}{8R},$$

где  $S_z$  – подача на зуб фрезы;  $R$  – радиус фрезы.



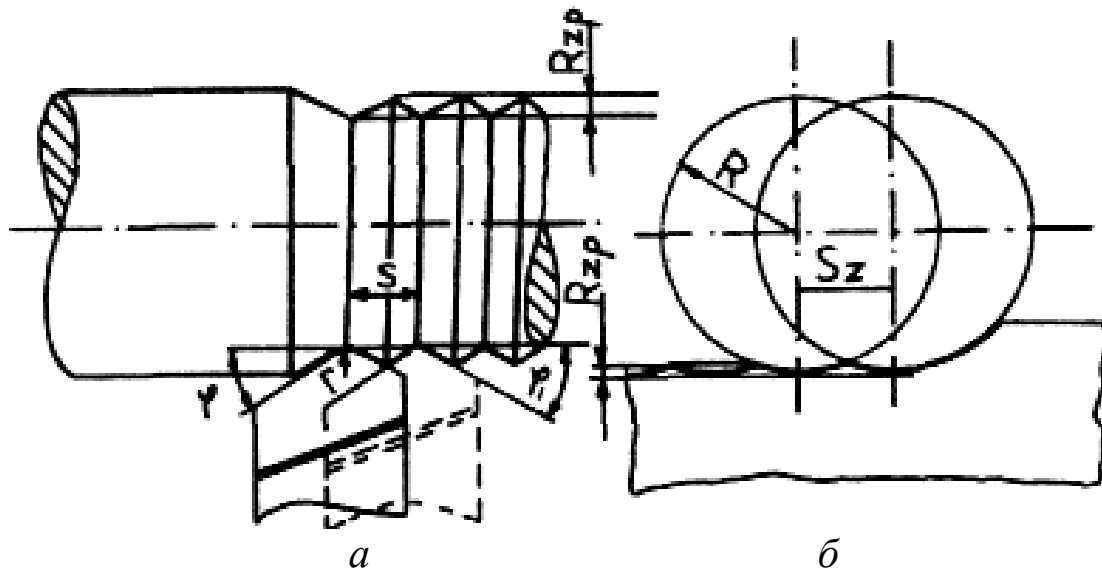


Рис. 6.50 Схема образования неровностей поверхности при точении (а) и цилиндрическом фрезеровании (б)

В случае токарной обработки проходным резцом с главным углом в плане  $\varphi$ , вспомогательным углом в плане  $\varphi_1$  и радиусом при вершине резца  $r$  возможны три случая формирования остаточного гребешка:

1) резание только радиусной частью резца ( $\varphi, \varphi_1 < \arcsin S/2r$ ); тогда высоту микронеровностей можно рассчитать по формуле:

$$Rz_p = r - \frac{1}{2} \sqrt{4r^2 - S^2} \approx \frac{S^2}{8r};$$

2) резание радиусной частью и вспомогательной режущей кромкой при выполнении соотношений  $\varphi > \arcsin S/r$  и  $\varphi_1 < \arcsin S/2r$ :

$$Rz_p = r(1 - \cos \varphi_1) + S \sin \varphi_1 \cos \varphi_1 - \sin \varphi_1 \sqrt{S \sin \varphi_1 (2r - S \sin \varphi_1)};$$

3) резание радиусной частью, главной режущей кромкой и вспомогательной режущей кромкой

$$Rz_p = \frac{\sin \varphi_1 \sin \varphi}{\sin(\varphi + \varphi_1)} \left[ S - r \left( \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2} + \operatorname{tg} \frac{\varphi_1}{2} \right) \right].$$

Как видно, шероховатость обработанной поверхности снижается с уменьшением главного и вспомогательного углов в

плане резца, подачи и с увеличением радиуса при вершине резца. Указанные параметры влияют на шероховатость в основном непосредственно как геометрические факторы.

Оценка шероховатости по указанным расчетным зависимостям с приемлемой точностью проводится для поверхностей с шероховатостью  $R_z > 10$  мкм. Для более чистых поверхностей определение шероховатости проводится по эмпирическим зависимостям. В ряде случаев фактическая высота микронеровностей существенно выше расчетной, что связано в основном с образованием нароста на передней грани инструмента, особенно в зоне его неустойчивого состояния. Периодичность образования нароста и его срывы ухудшают не только микрогеометрию поверхности, но и приводят к неоднородности ПС по структуре и механическим свойствам.

Глубина и скорость резания, радиус округления режущего лезвия и его износ, СОТС, вибрации, свойства обрабатываемого и инструментального материала оказывают влияние на шероховатость через физико-химические процессы в очаге деформации и формирования ПС.

Технологические факторы влияют на пластическое течение металла, трение в зоне контакта с инструментом и упруго-пластическое восстановление металла за ним. Основное приращение шероховатости поверхности происходит за счет пластического течения металла из зоны образования стружки и формирования ПС в сторону соседнего следа. С уменьшением деформации металла в зоне образования стружки и ПС, что проявляется в уменьшении усадки стружки, снижается приращение шероховатости за счет пластических деформаций.

На режущем лезвии инструмента при его изготовлении и износе в процессе работы возникают зазубрины, которые в определенной степени копируются обработанной поверхностью. Так при затуплении цилиндрических фрез шероховатость в поперечном направлении может возрасти на 100...115 %, сверлении на 30...40 %, развертывании на 20...30 % [17]. Для устранения влияния зазубрин и притупления режущего лезвия рекомендуется тщательная доводка инструментов и своевременная их переточка.

Скорость резания является одним из доминирующих факторов, влияющих на развитие пластических деформаций. В случае

обработки углеродистых сталей зависимость шероховатости от скорости резания имеет экстремум (рис. 6.51). Возрастание шероховатости в интервале скоростей резания 20-40 м/мин связано с образованием нароста на режущем лезвии, его последующем срыве и переносе на обрабатываемую поверхность. При скоростях свыше 70 м/мин нарост не образуется и прирост шероховатости уменьшается. При больших скоростях резания объем пластически деформируемого металла незначителен и высотные параметры шероховатости приближаются к расчетным значениям. При обработке хрупких материалов (например, чугуна) повышение скорости резания уменьшает откалывание частиц, и поверхность детали становится менее шероховатой.

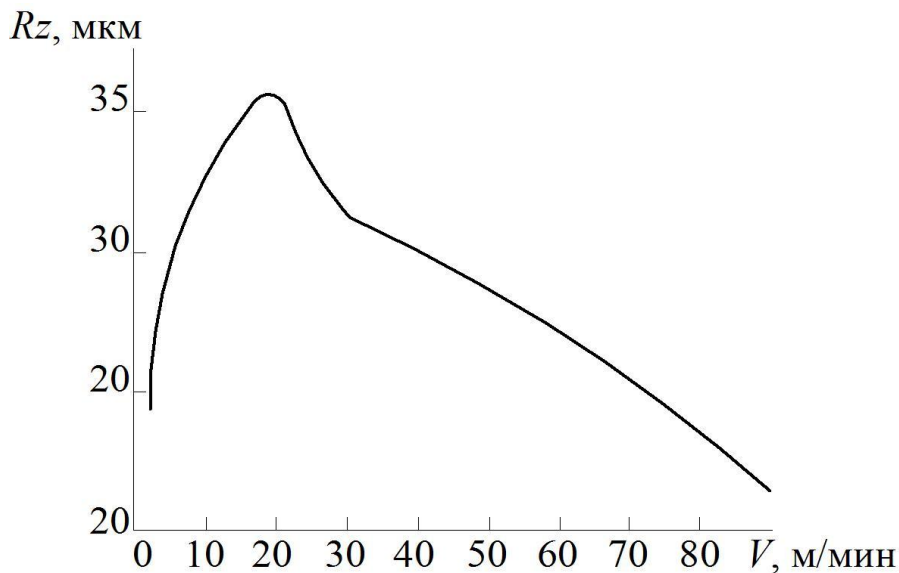


Рис. 6.51 Влияние скорости резания на образование шероховатости при точении стали 45

Подача существенно влияет на упруго-пластические деформации зоны резания. При работе с небольшими подачами может произойти возрастание шероховатости (кривая 1 на рис. 6.52) по сравнению с расчетной (кривая 2). Это связано с упругим восстановлением геометрических неровностей обработанной поверхности ниже точки разделения потоков металла в стружку и под инструмент, имеющий радиус округления  $\rho$ .

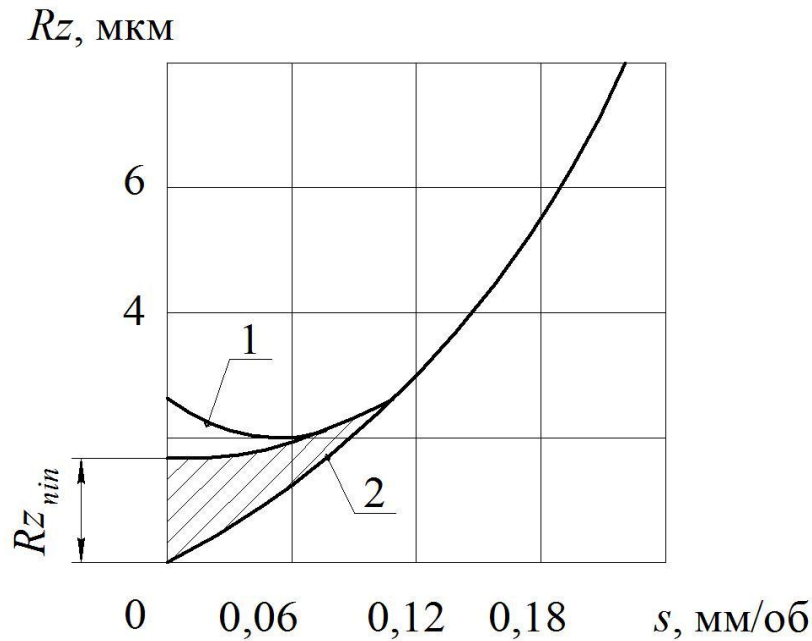


Рис. 6.52 Зависимость шероховатости от подачи

При работе со средними и большими подачами действие сил трения на задней поверхности резца оказывает влияние на микрогеометрию поверхности через «задиры». Однако значительного искажения продольной шероховатости при этом, как правило, не происходит. При больших подачах поперечная шероховатость обычно бывает значительно больше продольной шероховатости (кроме случаев обработки резцом с зачищающей кромкой, при  $\varphi=0$ ). При малых подачах большое влияние на шероховатость оказывает заторможенный слой обрабатываемого материала на поверхности инструмента. Для получения низкой шероховатости обработку с малыми подачами необходимо вести на высоких скоростях резания, при которых снижается величина заторможенного слоя.

Глубина резания, как нестационарный технологический параметр, может влиять на высоту микронеровностей через контактные процессы на передней и задней поверхности, усиливая или уменьшая наростообразование, температуру резания и др. При уменьшении глубины резания до 0,02 мм (вследствие наличия радиуса округления режущей кромки) резец начинает отжиматься от детали и скользит по ее поверхности, периодически врезаясь и вырывая отдельные участки металла. При глубине ре-

зания менее подачи уменьшение собственно глубины оказывает геометрическое влияние, снижая высоту шероховатости поверхности.

На шероховатость обработанной поверхности оказывает существенное влияние химический состав, структура и физико-механические свойства обрабатываемого материала. Более вязкие и пластичные материалы (например, малоуглеродистая сталь), склонные к пластическим деформациям, дают при обработке резанием грубые и шероховатые поверхности. С увеличением твердости углеродистых сталей и уменьшением различия в твердости ее структурных составляющих шероховатость обработанной поверхности снижается. При обработке силуминов с увеличением содержания кремния (от 2 до 25 %) наблюдается непрерывное уменьшение шероховатости.

Физико-химические свойства материала режущей части инструмента могут оказывать влияние на микрогеометрию обработанной поверхности за счет изменения адгезионных процессов на контактирующих поверхностях и способности режущей кромки инструмента сохранять свой контур в процессе резания. По мере износа режущая кромка оказывает на микрогеометрию обработанной поверхности как чисто геометрическое влияние, так и влияние за счет изменения триботехнических характеристик контактирующих поверхностей.

В зависимости от состояния поверхности контакта обрабатываемого материала и режущей кромки инструмента со стороны его задней грани может существовать внешнее или внутреннее трение в деформируемом металле (по границе раздела заторможенного слоя с металлом, уходящим в ПС), а также внешнее трение на некоторых участках контакта.

Существенное влияние на шероховатость обработанной поверхности оказывает жесткость технологической системы (статическая и динамическая, рис. 6.53).

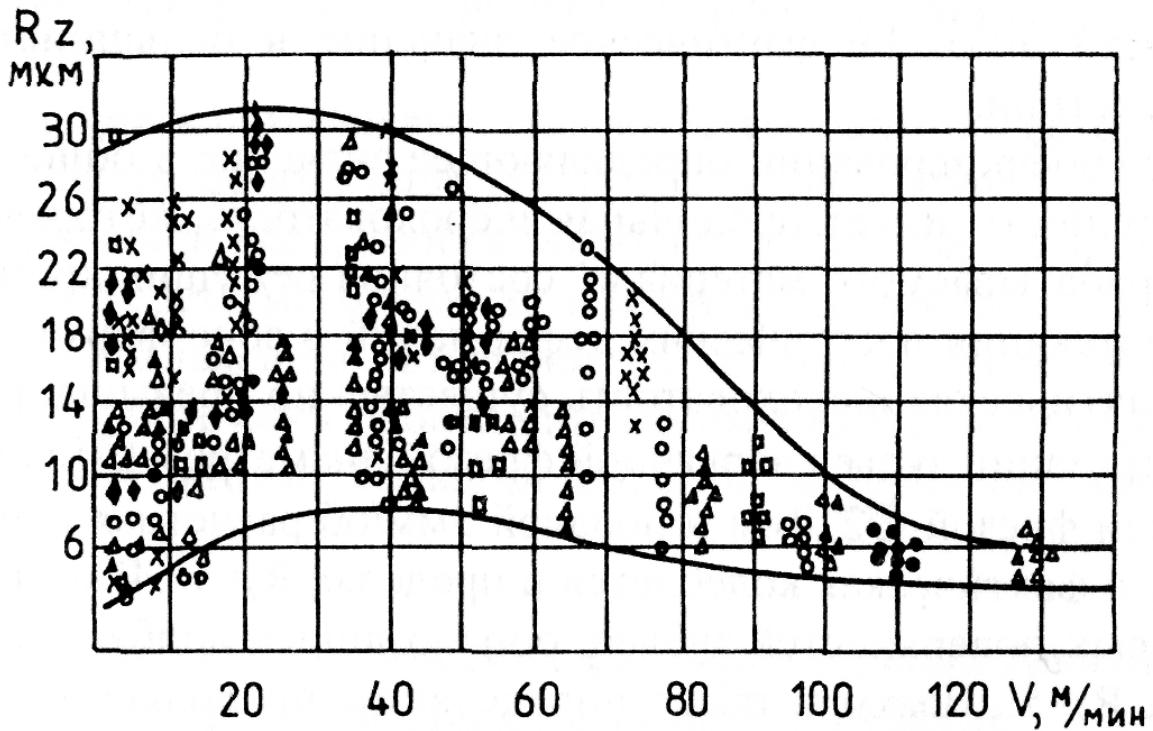


Рис. 6.53 Влияние жесткости ( $J$ , Н/мм) токарного станка на шероховатость обработанной поверхности при различной скорости резания:  $\circ$  – 96 Н/мм;  $\bullet$  – 114 Н/мм;  $\blacklozenge$  – 260 Н/мм;  $\Delta$  – 435 Н/мм;  $\square$  – 450 Н/мм;  $\times$  – 475 Н/мм

Видно, что с понижением жесткости станка опытные точки занимают более высокое положение в поле рассеяния. Максимальное поле рассеяния величины  $R_z$  наблюдается при обработке с низкими скоростями резания и в зависимости от жесткости станка изменяется в очень широких пределах ( $R_z=4\ldots 30$  мкм). По мере увеличения скорости резания поле рассеяния сужается и при  $V=100$  м/мин  $R_z=4\ldots 10$  мкм.

Вибрации в технологической системе являются фактором, увеличивающим высоту микронеровностей обработанной поверхности. Увеличение амплитуды колебаний ведет к росту высоты шероховатости, увеличение частоты колебаний оказывает обратное действие (рис. 6.54).

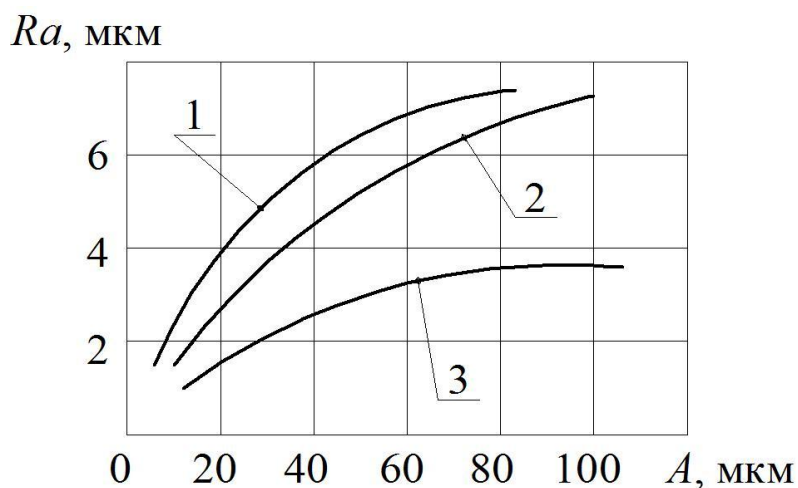


Рис. 6.54. Влияние параметров автоколебаний на шероховатость поверхности при точении сталей: 1 – О8Х15Н5Д2Т; 2 – 12Х18Н9Т (1 и 2 при  $f = 40\text{--}190$  Гц); 3 – О8Х15Н5Д2Т ( $f = 500\text{--}600$  Гц)

Вибрации становятся доминирующим фактором в формировании шероховатости на окончательных операциях обработки деталей – тонком точении и растачивании. Снизить амплитуду вибраций и, следовательно, шероховатость обработанной поверхности можно за счет увеличения жесткости элементов технологической системы, оптимизации геометрии режущего инструмента, режимов обработки и др.

Результаты исследований и производственный опыт показывают, что применение соответствующих смазывающих и охлаждающих технологических сред приводит к улучшению микрогеометрии обработанной поверхности. Эффективность влияния СОТС на микрогеометрию обработанной поверхности изменяется в зависимости от скорости резания. Так при обработке углеродистых сталей со скоростями резания свыше 50 м/мин влияние СОТС сильно снижается, т.к. сокращается длительность физико-химического воздействия среды на контактирующие поверхности. Уменьшаются также различия между влиянием разных СОТС. Другой причиной снижения влияния СОТС с увеличением скорости резания можно считать уменьшение толщины заторможенного слоя и повышение его стабильности, что затрудняет проникновение СОТС на поверхности контакта.

При абразивной обработке к геометрическим факторам образования шероховатости поверхности следует отнести размер абразивных зерен, их форму и расстояние между ними; скорость вращения инструмента; продольную (осевую) подачу инструмента или изделия; скорость вращения детали при круглом шлифовании; количество ходов выхаживания; режим правки шлифовального круга.

При обработке абразивными инструментами каждое абразивное зерно, участвующее в резании, прорезает в обрабатываемой поверхности канавку. Вследствие беспорядочного расположения зерен при втором ходе инструмента по обработанной поверхности абразивные зерна могут попасть на участки несрезанного металла, прорезая новые канавки и уменьшая высоту неровностей. Тем не менее, в конечном итоге уменьшение зернистости приводит к уменьшению шероховатости обработанной поверхности [8].

С увеличением скорости резания, что означает увеличение частоты вращения круга, возрастает число зерен, пересекающих определенные сечения шлифуемой поверхности. Совокупность абразивных зерен приближается к сплошному лезвию, как в осевом направлении, так и по окружности, и продольные шероховатости выравниваются и уменьшаются по высоте. Аналогичная картина наблюдается при уменьшении частоты вращения изделия.

Важным геометрическим фактором при круглом шлифовании является продольная подача на один оборот изделия. Если, например, продольная подача равна половине высоты круга, то при втором обороте изделия зерна второй половины круга будут проходить по уже обработанному участку, срезая образованные неровности. Таким образом, при уменьшении продольной подачи шероховатость обработанной поверхности уменьшается.

Выхаживание оказывает такое же влияние, как и продольная подача. При увеличении числа ходов выхаживания шероховатость и волнистость снижаются до определенного предела, зависящего от зернистости круга.

При шлифовании в зоне резания возникают высокие давления и локальный нагрев тонких поверхностных слоев обработанной поверхности. Увеличение степени деформации металла наблюдается



при увеличении глубины резания, продольной подачи, скорости вращения изделия. Пластическая деформация поверхностного слоя выражается в вытягивании кристаллических зерен, появлении надрывов и местных выпучиваний металла, что вызывает рост высоты микронеровностей на обработанной поверхности.

Теплота, концентрирующаяся в поверхностном слое, повышает его пластичность. Металл оплавляється и размазывается по обработанной поверхности, покрывая обработочные риски и уменьшая неровности поверхности.

Итоговая картина получается в результате совместного действия указанных факторов. В любом случае действительные величины шероховатости отличаются от величин, обусловленных геометрическими причинами.

Финишные отделочные абразивные методы обработки (суперфиниширование, хонингование, доводка, притирка) сводятся к двум разновидностям деформирования металла: микрорезанию со снятием очень тонких стружек и пластическому деформированию – полированию. В ряде случаев процессы могут выполняться в две указанные стадии для использования преимуществ обеих.

При микрорезании высота неровностей геометрически непосредственно связана с зернистостью абразива. При доводке в режиме микрорезания пластические деформации искажают форму и увеличивают размеры неровностей, возникающих под влиянием геометрических факторов.

При отделке в режиме полирования происходит сглаживание неровностей, перетекание металла выступов во впадины. Это изменяет форму и направление неровностей и позволяет уменьшить их величину до предельных значений.

При обработке ППД формирование шероховатости связывают с параметрами пластического течения металла в очаге деформации [14].

Основной технологический фактор, влияющий на шероховатость поверхности – силовой, определяемый величиной заданной силы или заданного натяга (рис. 6.55). Как видно, при небольшой силе обкатывания большой градиент анализируемой зависимости; на этом участке имеет место геометрический характер уменьшения неровно-

стей за счет их осадки. Установлено, что наименьшую шероховатость можно достичь при натяге ролика  $h_d = (1,1 \dots 1,3) R_{z_{исх}}$ .

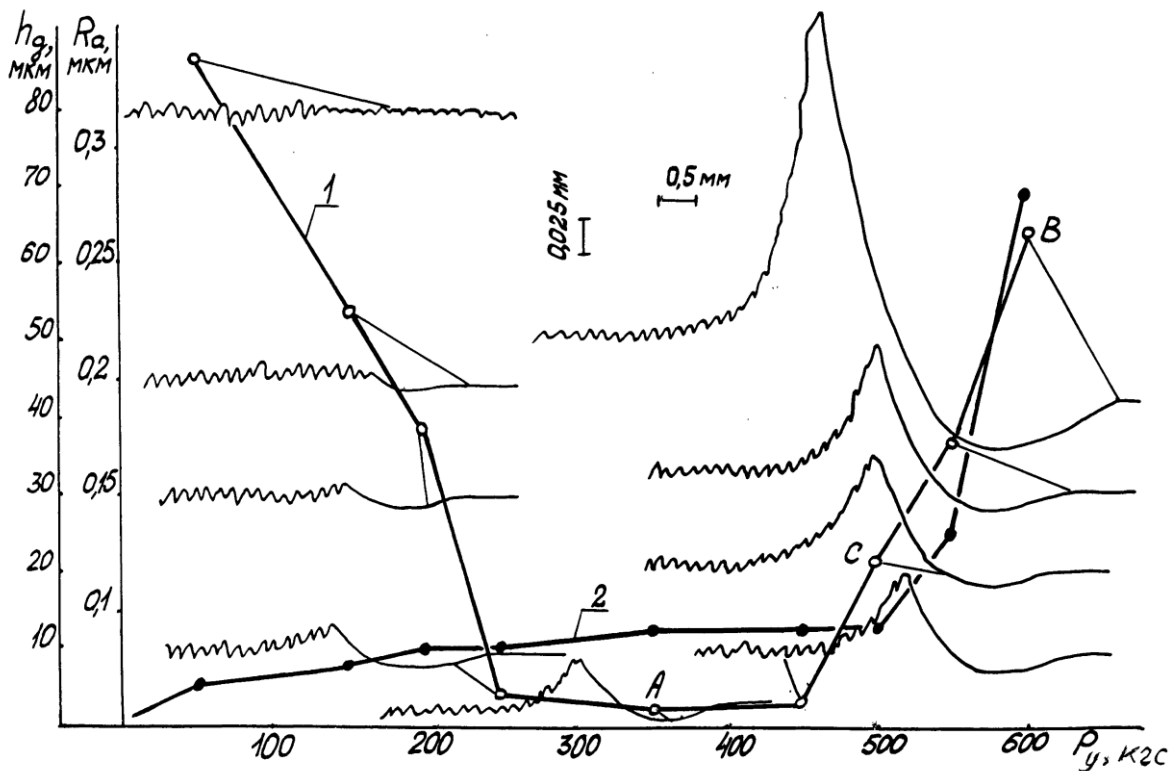


Рис. 6.55. Влияние силы обкатывания на шероховатость поверхности (1), действительный натяг (2), форму и размеры контура очага деформации при обкатывании роликом: сталь 40ХН2МА; профильный радиус ролика  $R_{пр} = 5$  мм; диаметр ролика  $D_p = 50$  мм; диаметр детали

$$D_d = 38 \text{ мм}; n = 630 \text{ мин}^{-1}; S = 0,064 \text{ мм/об}; R_{z_{исх}} = 10 \text{ мкм}$$

Значительную роль в формировании шероховатости играет вторичное пластическое течение металла за деформирующим инструментом. Экспериментально установлено, что вторичное искажение микропрофиля наблюдается тем существеннее, чем больше величина пластического подъема и меньше радиус задней внеконтактной поверхности очага деформации.

Одним из перспективных направлений повышения качества и производительности обработки труднообрабатываемых материалов является обработка с подогревом зоны резания плазмой, лазерным лучом, токами высокой или промышленной частоты (индукционный нагрев ТВЧ). Исследованиями установлено, что при лазерно-

механической обработке снижается шероховатость поверхности, глубина и степень наклепа, устраняются сколы и микротрещины. Так, шероховатость ПС высокомарганцевой износостойкой стали типа 10Г13Л после лазерно-механической обработки в 4,5 раза меньше, чем после традиционной мехообработки [8]. При чистовой механической обработке таких материалов, как вольфрам, молибден, никелевые сплавы, высокохромистые стали, и чугуны процесс стружкообразования и формирования ПС определяется явлениями хрупкого отрыва, обусловленными периодическими процессами развития опережающей трещины. Предварительный нагрев заготовки позволяет перевести процесс разрушения при обработке резанием таких материалов в область пластических деформаций с образованием сливной стружки. Шероховатость обработанной поверхности при этом снижается с  $Ra=20\text{...}40$  мкм до  $Ra=1,5\text{...}5,5$  мкм. В 2...2,5 раза снижается высота микронеровностей при лазерно-механическом точении деталей из высокохромистого чугуна СЧХ28Н2 и никелевого сплава ЭИ437Б в диапазоне скоростей резания 3...35 м/мин и 10...92 м/мин соответственно. При обычной обработке чугуна на скоростях 3...12 м/мин поверхность выглядит неоднородной с сеткой царапин и вырывов, что связано с интенсивными адгезионными явлениями. Подогрев срезаемого слоя изменяет стружку скалывания на сливную. Царапины и вырывы на обработанной поверхности исчезают.

Ниже приведены статистические математические модели для расчета высотных параметров шероховатости, полученные для различных обрабатываемых и инструментальных материалов, методов и условий обработки (сталь 45):

- точение тонкое (алмазное)

$$Ra = 0,16 \frac{S^{0,59} (90 + \gamma^0)^{0,66}}{r^{0,29} V^{0,19}} ;$$

- зенкерование

$$Ra = 5,6 \frac{V^{0,16} S^{0,76}}{d^{0,23}} .$$

В справочной литературе приведены значения высотных параметров шероховатости для случаев обработки деталей из углеродистых и легированных сталей, жаропрочных и титановых сплавов, чугунов и других материалов.

### 6.8.2 Влияние технологических факторов на упрочнение и остаточные напряжения

По степени влияния на деформационное упрочнение ПС основные факторы лезвийной обработки можно расположить в последовательности:

- физико-химические свойства и структурно-фазовое состояние обрабатываемого металла;
- материал и геометрия режущей части инструмента: радиус при вершине резца, радиус округления режущей кромки, характер и величина износа инструмента, передний угол, главный угол в плане, задний угол;
- режим обработки: подача, скорость резания, глубина резания;
- СОТС.

Глубина наклепа после точения стали 45 резцами с пластинками твердого сплава Т15К6 может быть определена по эмпирической формуле:

$$h = \frac{4,12S^{0,022}t^{0,11}\alpha^{0,02}\rho^{0,061}}{r^{0,31}(90 + \gamma^0)^{0,44}}.$$

Глубина и степень наклепа ПС изменяются в широких пределах, а кривые распределения микротвердости по глубине ПС могут иметь разный характер. В одних случаях происходит небольшое повышение микротвердости (10...20 %) и кривая упрочнения имеет пологий характер по глубине. В других случаях наблюдается значительное повышение микротвердости (на 200...300 %) и кривая упрочнения характеризуется большими градиентами изменения микротвердости по глубине, особенно в тонком ПС. В зависимости от условий лезвийной обработки деталей из углеродистых и легированных сталей глубина наклепа ПС изменяется в пределах 0,05...0,3 мм, но может достигать и больших значений. После наиболее распространенных методов обработки (точение, фрезерование, сверление, зенкерование, строгание и др.) микротвердость ПС повышается на 30...80 %. При этом вершины микронеровностей упрочняются в большей степени, чем впадины. Как правило, наблюдается также большой разброс значений микротвердости, что связано с размерами зерен и различной микротвердо-

стью структурных составляющих сталей и сплавов (например, более мягкого феррита и более твердого перлита в углеродистых сталях).

Процесс деформации и упрочнения металла в зоне образования стружки и ПС идет избирательным путем, и отдельные структурные составляющие упрочняются в различной степени. Исследование наклепа после точения стали 45 показало, что степень и глубина наклепа зерен феррита всегда больше, чем зерен перлита.

В зонах, прилегающих к впадинам шероховатости, с увеличением скорости резания глубина наклепа уменьшалась. По гребешку глубина наклепа больше, чем по впадине. Этот факт, а также отсутствие связи глубины наклепа на гребешке со скоростью можно объяснить тем, что при обработке токарным проходным резцом гребешок претерпевает многократную деформацию, что искажает влияние скорости резания на упрочнение ПС. В ПС металла зоны впадины заметна явно выраженная тенденция уменьшения глубины наклепа с увеличением скорости резания (при  $V > 100$  м/мин), что связано с изменением условий формирования ПС в связи с изменением размеров, геометрии нароста и толщины заторможенного слоя.

Так с увеличением скорости резания от 150 до 500 м/мин глубина наклепа по зернам феррита уменьшается с 0,08 до 0,01 мм, а по зернам перлита с 0,04 до 0,01 мм.

Геометрия инструмента и режимы резания в широких пределах могут изменять условия пластической деформации и тепловые процессы в зоне резания и формирования ПС, а значит, и его деформационное упрочнение. Экспериментально установлено, что зависимость глубины и степени упрочнения от скорости резания носит экстремальный характер (рис. 6.56).

Наименьшие значения этих величин имеют место при оптимальных скоростях и температурах, при которых наблюдается наименьший коэффициент трения и интенсивность износа инструмента.

Ниспадающий участок кривой объясняется увеличением скорости деформации и ее локализации в тонком ПС, уменьшением времени контакта режущего лезвия с деталью, снижением давлений на передней и задней гранях режущего лезвия, умень-

шением коэффициента трения, возрастанием скорости процесса разупрочнения с увеличением температуры.

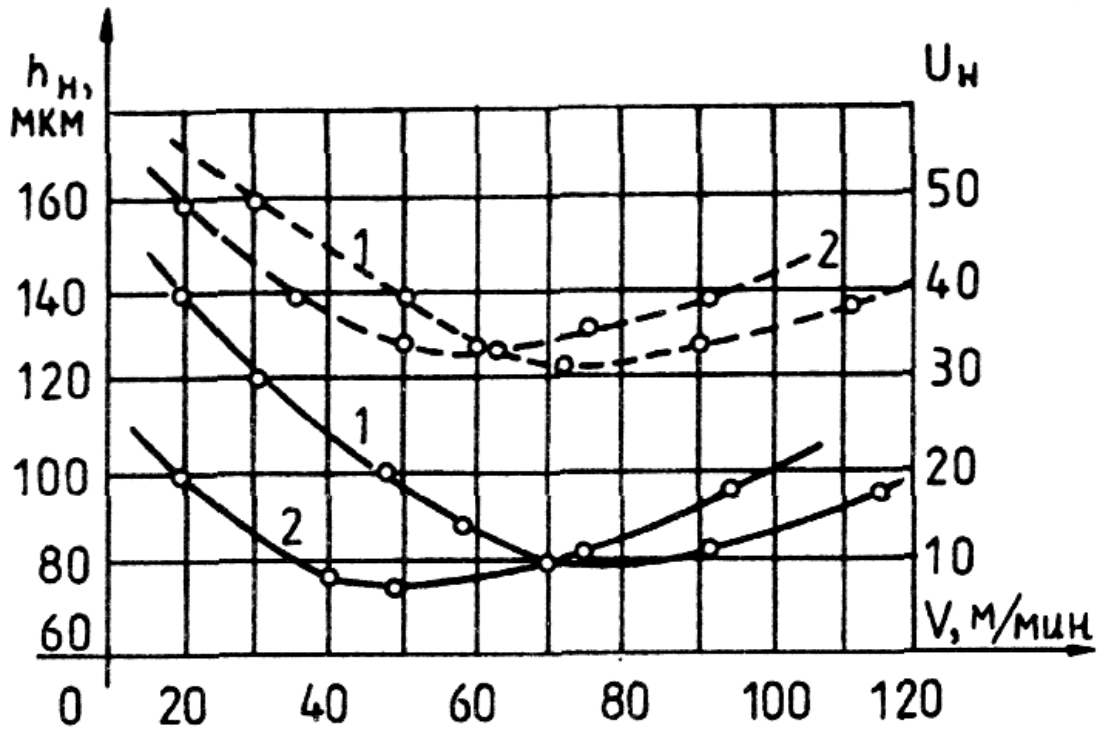


Рис. 6.56 Влияние скорости резания на глубину  $h_n$  и степень  $U_n$  наклепа при точении стали ЭИ654 резцом с ВК6М

Возрастающий участок кривой определяется увеличением пластических свойств обрабатываемого материала с увеличением температуры, коэффициента трения, радиуса при вершине нароста и др.

Влияние подачи на деформационное упрочнение проявляется через толщину срезаемого слоя и температуру. При температурах ниже оптимальной глубина и степень наклепа с увеличением подачи увеличиваются, при температурах выше оптимальной — уменьшаются. Наклеп увеличивается с уменьшением переднего угла  $\gamma$ , и с увеличением радиуса округления режущей кромки  $\rho$ , углов в плане ( $\phi$  и  $\phi_1$ ) (рис. 6.57-6.58).

Существенное влияние на степень и глубину наклепа оказывает износ инструмента, так как при этом увеличивается радиус округления режущей кромки и силы резания. Так, при точении и фрезеровании углеродистых сталей увеличение износа по задней грани с 0,1 до 0,3...0,4 мм растет глубина наклепа на 20...40 %, а степень наклепа — на 15...30 %.

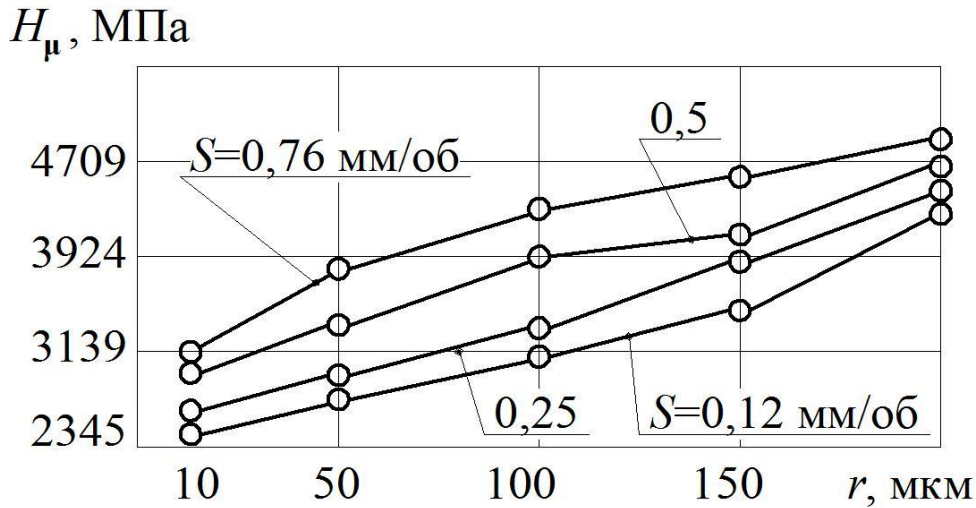


Рис. 6.57 Влияние подачи и радиуса округления лезвия резца на микротвердость  $H_{\mu}$  обточенной поверхности

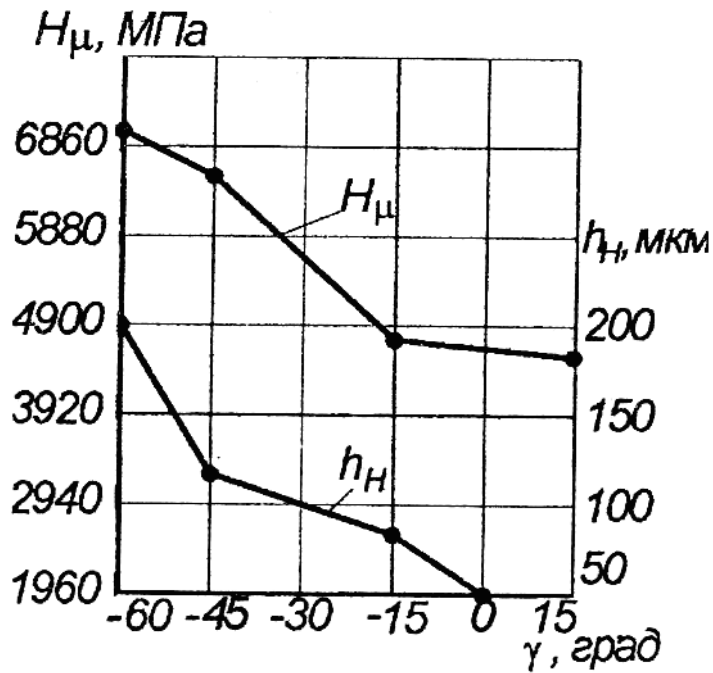


Рис. 6.58 Влияние переднего угла резца на микротвердость и глубину наклепа

Абразивная и алмазная обработка также сопровождаются упрочнением ПС. Так, после шлифования высокоуглеродистой стали У8 микротвердость ПС увеличивалась на 60...65 %, а иногда и на 100 %. Повышение скорости резания без изменения остальных условий шлифования уменьшает толщину срезаемой отдельным зерном стружки, соответственно снижается сила резания и пластическая деформация ПС. Уменьшение зернистости шлифовального круга также

снижает нагрузку на отдельное абразивное зерно и снижает степень и глубину деформационного упрочнения. Однако следует иметь в виду, что при абразивной и алмазной обработке изменение микротвердости ПС происходит в результате совместного воздействия пластических деформаций и нагрева. При этом в зависимости от температуры нагрева и скорости охлаждения в ПС могут формироваться как структуры закалки, так и отпуска, а также переходные структуры. На кривых микротвердости по глубине ПС это проявляется как в повышении, так и в понижении микротвердости по сравнению с основным металлом.

В наибольшей мере упрочняющий эффект обнаруживается при использовании метода поверхностного пластического деформирования (ППД). Ключевое влияние на упрочнение ПС оказывают профильный радиус (ролика, шарика)  $R_{np}$ , а также натяг деформирующих инструментов  $h_p$ :

$$h = 3\sqrt{R_{np} h_p}, \quad \delta = \sqrt{\frac{2h_p}{R_{np}}}.$$

Остаточные напряжения в поверхностном слое возникают и трансформируются на всех стадиях изготовления детали.

Высокий уровень остаточных напряжений независимо от знака в поверхностном слое оказывает негативное воздействие на погрешность формы деталей вследствие их коробления.

При лезвийной обработке малопластичных материалов с уменьшением передних углов, ростом величины износа инструмента уровень сжимающих напряжений и глубина их залегания растут. При обработке пластичных материалов возрастают растягивающие напряжения (рис. 6.59–6.60).

Увеличение подачи при точении приводит к увеличению растягивающих напряжений при обработке пластичных жаропрочных материалов, увеличению сжимающих напряжений у малопластичных титановых сплавов (рис. 6.61, а) и увеличению растягивающих напряжений при обработке малопластичных закаленных сталей 30ХГСНА и 30ХГС (рис. 6.61, б).



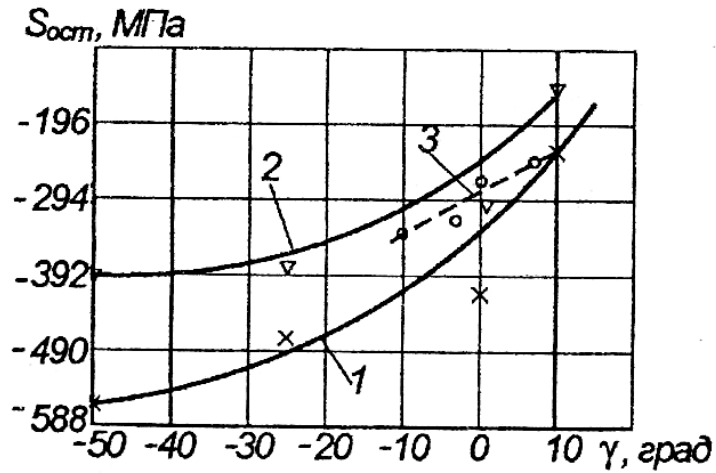


Рис. 6.59 Влияние переднего угла на остаточные напряжения при точении: 1 – сталь 30XГСНА; 2 – сталь 30XГС; 3 – сплав ВТ6

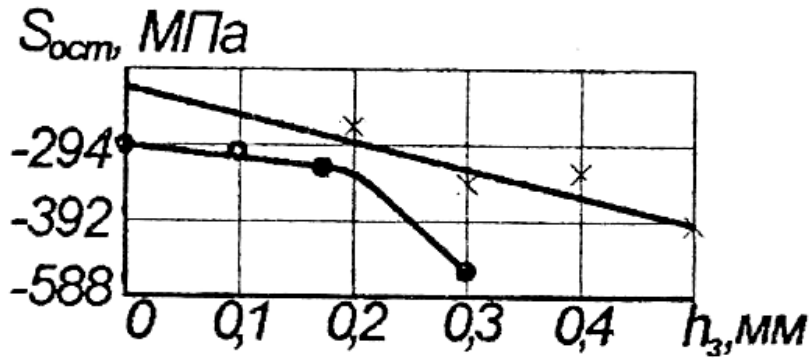


Рис. 6.60. Влияние износа резца на остаточные напряжения при точении: 1 – сталь 30XГС; 2 – сплав ВТ6

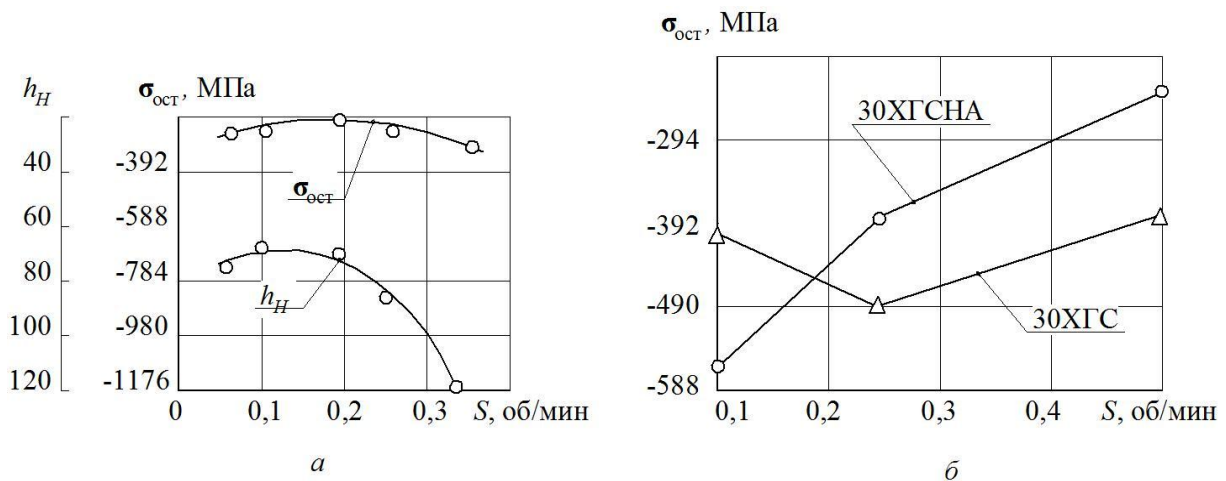


Рис. 6.61 Влияние подачи на формирование остаточных напряжений при точении

Повышение уровня сжимающих напряжений при увеличении скорости резания стали 30ХГС (рис. 6.62, *а*) объясняется возможной закалкой ее поверхностного слоя при увеличении теплоты в зоне резания. Снижение уровня сжимающих напряжений у закаленных сталей (рис. 6.61, *б* и 6.62, *б*) при увеличении подачи и скорости резания может быть вызвано возможным отпуском материала при повышенных температурах.

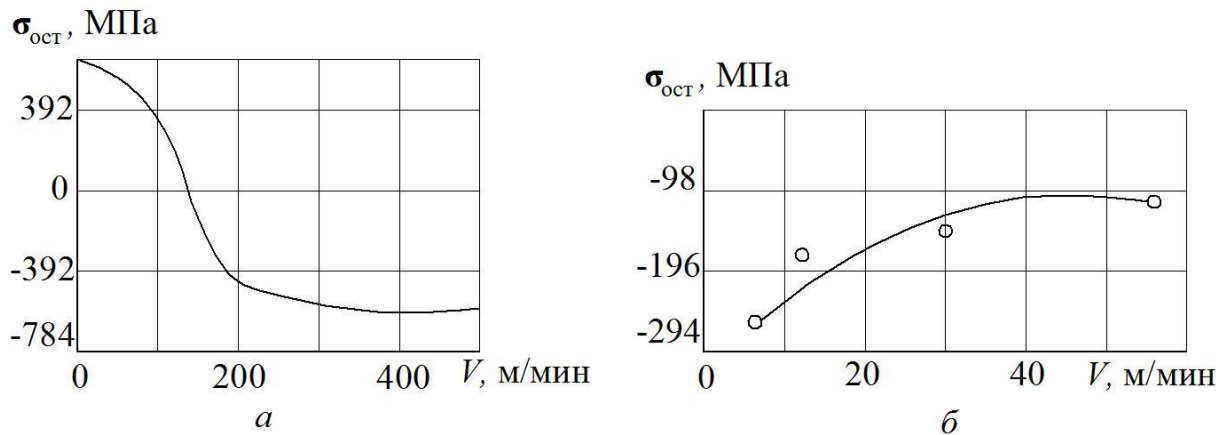


Рис. 6.62 Влияние скорости резания на остаточные напряжения при точении

Процесс шлифования протекает при больших напряжениях, возникающих в тонком слое металла и стружке, снимаемой при обработке с высокой скоростью резания (в десятки раз превосходящей скорость резания металлическим и твердосплавным инструментом), и при высокой температуре в зоне резания, которая иногда приближается к температуре плавления обработанного металла.

В этих условиях каждая из указанных ранее причин возникновения остаточных напряжений поверхностного слоя может преобладать над другими, и тогда характер распределения, знак и величина остаточных напряжений поверхностного слоя после шлифования будут в основном зависеть от этой причины.

Изменение условий шлифования, влекущее за собой повышение температуры металла поверхностного слоя (ухудшение охлаждения, уменьшение теплопроводности обрабатываемого материала, увеличение частоты вращения круга, затупление, засаливание круга, повышение его твердости, увеличение глубины шлифования и подачи, снижение скорости вращения изделия), приводит к росту остаточных растягивающих напряжений или снижению сжимающих

остаточных напряжений. И наоборот, снижение нагревания зоны шлифования и усиление силового воздействия абразивных зерен, вызывающее пластическую деформацию металла поверхностного слоя (увеличение глубины и подачи шлифования при хорошем отводе теплоты, использование мягких кругов и алмазных кругов с хорошим теплоотводом, рост скорости вращения изделия и снижение скорости вращения круга, применение выхаживания), способствуют уменьшению тепловых растягивающих и увеличению сжимающих остаточных напряжений.

Особенностью ППД является формирование поверхностного слоя со сжимающими остаточными напряжениями, распространяющимися на большую глубину (рис. 6.63).

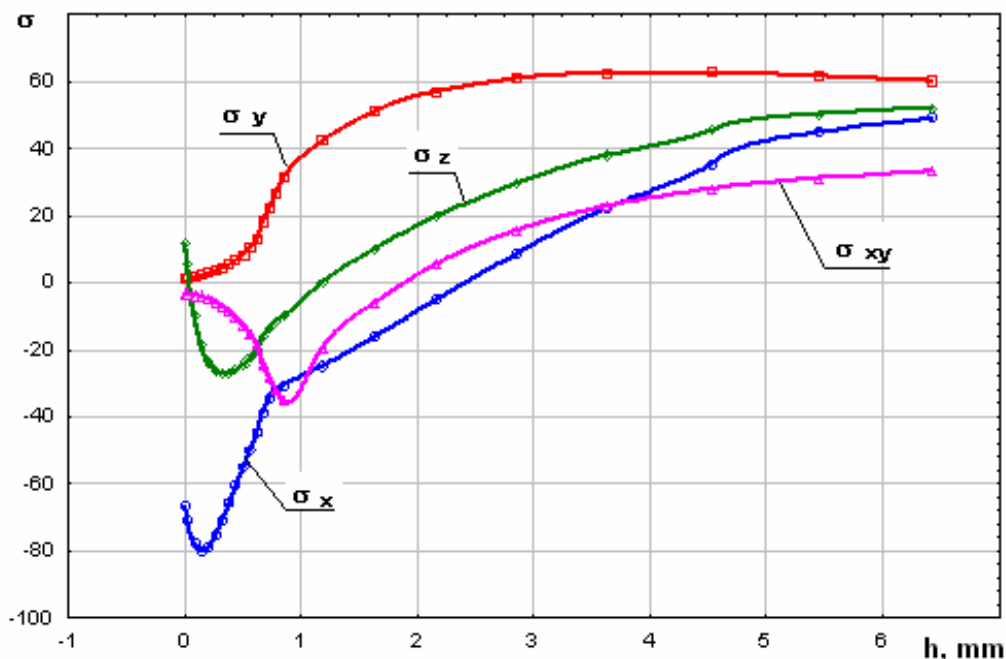


Рис. 6.63 Распределение компонент тензора остаточных напряжений ( $\text{кгс}/\text{мм}^2$ ) по глубине поверхностного слоя

## 6.9 Влияние качества поверхностного слоя на эксплуатационные свойства деталей машин

Надежность функционирования изделий машиностроения определяется рядом эксплуатационных свойств (ЭС) деталей и их соединений: статической и усталостной прочностью, поверхностной контактной статической и динамической прочностью, коррозионной стойкостью, контактной жесткостью, герметичностью, износостой-

костью, прочностью посадок и др. Все эти эксплуатационные свойства в значительной мере зависят от качества поверхностного слоя деталей, так как все разрушения (статические, усталостные, контактные, коррозионные и др.) начинаются с поверхности (табл. 6.6).

В настоящее время установлено, что:

1) снижение шероховатости поверхности повышает усталостную прочность и износостойкость. Большое значение имеют не только высотные параметры, но и форма и направление микронеровностей;

2) упрочнение или наклеп поверхностного слоя в существенной мере определяет износостойкость, усталостную прочность и долговечность деталей машин. При этом дискуссионными являются вопросы относительно глубины и степени наклепа, соотношения глубины наклепа и диаметра детали;

3) сжимающие остаточные напряжения повышают эксплуатационные свойства деталей машин. Положительное влияние сжимающих остаточных напряжений на усталостную долговечность обусловлено их суммированием с неблагоприятными растягивающими эксплуатационными напряжениями и снижением уровня действующих напряжений.

Для каждого материала существует некоторое оптимальное соотношение между остаточными напряжениями и наклепом, которое в максимальной мере повышает предел выносливости. Считается, что влияние остаточных напряжений преобладает для металлов высокой прочности, а влияние наклепа – для металлов низкой прочности. Б. А. Кравченко полагает, что доля влияния остаточных напряжений на предел усталости составляет 69 %, а наклепа – 31 % [18]. По мнению А. А. Маталина, остаточные напряжения, наклеп и шероховатость поверхности изменяют сопротивление усталости в соотношении 1,5:1,25:1,03 [17].

Таблица 6.6

Взаимосвязь эксплуатационных свойств деталей машин с параметрами качества поверхностного слоя

Эксплуатационные свойства	Шероховатость								Волнистость		Упрочнение		Остаточные напряжения	
	$Ra$	$Rz$	$R_{max}$	$S_m$	$S$	$t_p$	$R_{bc}$	НН	$S$	$S_w$	$\delta$	$h$	$\sigma_0$	$h_\sigma$
Износостойкость:														
сухое трение	(+)	(+)	(+)	(+)	-	+	+	+	(+)	(+)		+	+	+
жидкое трение	+	(+)	(+)	+	(+)	+	+	+	+	+		(+)	+	(+)
Усталостная прочность	(+)	(+)	+	(+)	-	-	-	+	-	(+)	+	+	+	+
Контактная жесткость	(+)	(+)	(+)	(+)	-	+	+	+	(+)	(+)	+	-	(+)	-
Коррозионная стойкость	+	(+)	(+)	+	(+)	(+)	-	-	+	(+)	+	+	+	+
Прочность сопряжений	(+)	(+)	-	(+)	-	+	+	+	(+)	(+)	+	-	(+)	-

Примечание.

1. НН – направление неровностей.

2. Знак «+» означает сильное влияние; знак «-» – отсутствие влияния; знак «(+))» – ограниченное влияние.

Более ранние исследования И. В. Кудрявцева показывают, что «увеличение предела выносливости обкаткой роликами, по крайней мере, на 1/3 обязано благоприятному действию остаточных напряжений» [19].

Ниже приведены примеры зависимостей некоторых ЭС от параметров качества поверхностного слоя деталей машин [20].

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

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

$$k_{\sigma} = 1 + \frac{0,2}{t_m S_m} [2\gamma(R_{\max} - R_p)]^{0,5},$$

где  $\gamma$  – коэффициент, учитывающий влияние поверхностных остаточных напряжений на прочность детали.

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

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

$$P_{\max} = \frac{1,34mV_0^2}{y_{\text{пл}}},$$

где  $m$  – масса контактирующей детали;  $V_0$  – скорость приложения нагрузки;  $y_{\text{пл}}$  – пластические контактные деформации детали.

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

$$y_t = \left[ \frac{2\pi(P_{\text{ст}} + P_{\text{д}})RaW_z H_{\max}}{AH_{\mu}} \right]^{1/3} \left( \frac{t}{t_{\text{HB}}} \right)^{m_l/3},$$

где  $t$  – время действия сил;  $t_{\text{HB}}$  – время испытания на твердость по Бринеллю;  $m_l$  – показатель роста деформаций при действии динамической нагрузки;  $H_{\max}$  – максимальное макротекло-

ние;  $A$  – геометрическая площадь контакта;  $H_\mu$  – поверхностная микротвердость;  $\mu$  – коэффициент Пуассона.

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

$$v_k = v_{k_0} \left( 1,18\delta^4 + 4\delta^3 - 4,18\delta^2 \right) \left( k \frac{R_{\max} - R_p}{t_m^2 S m^2} \right)^{2/3},$$

где  $v_{k_0}$  – скорость коррозии материала детали;  $\delta$  – степень наклепа поверхностного слоя;  $k$  – эмпирический коэффициент.

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

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

где  $p$  – давление на площадь контакта, определяемое ее геометрическими размерами;  $y_k$  – контактные перемещения.

Контактные перемещения составляют значительную часть в балансе упругих перемещений машин и сборочных единиц. Например, в суппортах токарных станков контактные деформации составляют 80...90 % общих перемещений, в одностоечных координатно-расточных и вертикально-фрезерных станках – до 70 %, в двухстоечных карусельных станках – до 40 % и т.д. Контактная жесткость сказывается на точности работы приборов, на точности обработки и сборки, т.е. на качестве машиностроительных изделий. Значение *нормальных контактных сближений* двух деталей рассчитывается с учетом упругих и пластических контактных деформаций; при этом пластические деформации в первом приближении могут быть рассчитаны по формуле

$$y_{пл} = \pi \left( \frac{2\pi p R a W_z H_{\max}}{A H_\mu} \right)^{1/3}.$$

*Герметичность соединений* определяет их способность удерживать утечку газа или жидкости. С учетом геометрии и контактных

деформаций сопрягаемых поверхностей величина утечки в общем случае может быть определена по формуле

$$Q = k \frac{\pi d \Delta_p [0,5(H \max_1 + H \max_2 + W_{z_1} + W_{z_2}) + Rp_1 + Rp_2 - y_k]}{\mu' l},$$

где  $d$  и  $l$  – размеры соединения;  $\Delta_p$  – перепад давления;  $u$  – константа Кармана;  $\mu'$  – динамический коэффициент вязкости газа или жидкости;  $H \max_1$  и  $H \max_2$  – макроотклонения сопрягаемых поверхностей;  $W_{z_1}$  и  $W_{z_2}$  – средняя высота волн сопрягаемых поверхностей;  $Rp_1$  и  $Rp_2$  – высота сглаживания профиля шероховатости сопрягаемых поверхностей;  $y_k$  – контактные деформации сопрягаемых поверхностей, определяемые по формулам контактной жесткости.

При работе пар трения происходит *размерное изнашивание* (разрушение) поверхностных слоев, которое приводит к уменьшению размеров контактирующих деталей, т.е. их износу. Размерное изнашивание поверхностей трения характеризуется его интенсивностью, которая в период нормального изнашивания рассчитывается по формуле

$$I_h = \frac{1,2\pi p^{2/3}}{n\lambda t_m^{3/2} H_\mu^{2/3}} \sqrt{\frac{30(1-\mu^2)(2\pi Ra W_z H \max)^{1/3}}{ESm}},$$

где  $n$  – число циклов воздействия, которое приводит к разрушению материала;  $p$  – номинальное давление на поверхности трения;  $\lambda$  – коэффициент, учитывающий влияние поверхностных остаточных напряжений;  $E$  – модуль упругости.

Под *прочностью посадок с натягом* понимают их способность передавать крутящий момент ( $M_{кр}$ ) и осевые нагрузки ( $P$ ) без взаимного проскальзывания сопрягаемых деталей. Формулы для расчета прочности посадок с натягом с учетом качества учитывают параметры волнистости, шероховатости, микротвердости, геометрические размеры, коэффициенты трения и др.

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



Известно, что шероховатость поверхности регламентируется конструктором, исходя из служебного назначения и условий эксплуатации деталей. Заданные характеристики обеспечиваются в процессе изготовления. В первый период эксплуатации сопряженных поверхностей происходит их приработка, шероховатость поверхности изменяется, а сопрягаемые детали начинают работать в иных условиях. В зависимости от метода обработки поверхностей процесс приработки происходит с различной интенсивностью (рис. 6.64). По его завершении создается характерная для данных условий эксплуатации шероховатость, и изнашивание во времени происходит по одним и тем же законам. Износ  $I$  для методов обработки  $I, II, III$  характеризуется кривыми с одинаковыми углами наклона  $\theta$ , однако при заданном допустимом износе  $I_D$  сроки службы соединения оказываются различными ( $\tau_1, \tau_2, \tau_3$ ). Из этого следует вывод о важности выбора метода обработки поверхностей.

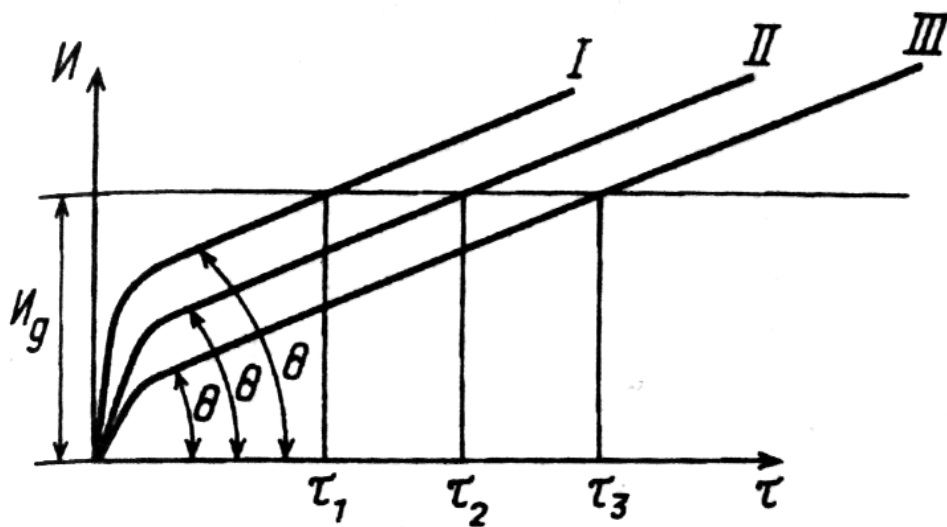


Рис. 6.64 Влияние метода обработки сопрягаемых поверхностей на служебные свойства деталей

Каждая пара сопрягаемых поверхностей требует своего набора параметров шероховатости и указания их на рабочих чертежах (табл. 6.7).

Таблица 6.7

Параметры шероховатости для разных условий  
функционирования поверхностей (мкм)

Поверхности деталей	$Ra$	$Rz$	$R \max$	$Sm$	$t_p$	$l$
Опорные шейки валов:						
под подшипники скольжения	0,32	–	–	–	$t_{20}30$	0,8
под подшипники качения	0,8	–	–	–	–	0,8
под зубчатые колеса	1,6	–	–	–	–	0,8
Поверхности валов, работающие на выносливость	–	–	1,0	–	$t_{20}60$	0,8
Поверхности под напыление	–	125	–	0,5	–	8,0
Поверхности основных отверстий корпусов:						
из чугуна	1,0-2,0	–	–	–	–	0,8
из стали	0,63-1,6	–	–	–	–	0,8
Направляющие трения скольжения:						
прецизионных станков	0,1	–	–	–	$t_{20}15$	0,25
тяжелых станков	1,6	–	–	–	–	0,8
Коррелирующие поверхности	0,063	–	–	0,032	$t_{20}10$	0,25

Деформационное упрочнение увеличивает твердость ПС, в результате чего уменьшаются взаимное внедрение и деформации микровыступов трущихся поверхностей [8]. Кроме того, в пластически деформированном ПС активизируются диффузионные процессы и химические реакции, которые способствуют образованию на стальных деталях твердых соединений ( $FeO$ ,  $Fe_2O_3$ ,  $Fe_3O_4$ ). Эти соединения характерны для окислительного износа, протекающего с наименьшей интенсивностью. Упрочнение препятствует развитию пластических деформаций ПС трущихся деталей, при которых может происходить их холодная сварка (адгезия или схватывание), приводящая к наиболее интенсивному изнашиванию. При перенаклепе металла его износостойкость снижается, так как перенаклеп приводит к исчерпанию пластических свойств и микродефектам в виде нарушения сплошности металла.

Зависимость износостойкости от глубины  $h$  и степени наклепа  $\delta$  ПС имеет экстремальный характер.

Технологические остаточные напряжения в тонком ПС не оказывают заметного влияния на изнашивание трущихся пар, так как в течение короткого времени работы они релаксируют и в ПС формируются сжимающие остаточные напряжения. Однако если большие остаточные напряжения распространяются в ПС на значительную глубину (более 0,5 мм), то растягивающие остаточные напряжения несколько увеличивают износ, а сжимающие напряжения его уменьшают. Но по сравнению с шероховатостью остаточные напряжения оказывают на износ более слабое влияние.

Влияние деформационного упрочнения ПС на усталостную и длительную прочность зависит от степени деформации ПС и условий эксплуатации: температуры, нагрузки, среды, продолжительности работы. Для каждого металла и сплава в конкретных условиях эксплуатации существует определенная степень предварительной пластической деформации, которая создает субструктуру металла с величиной скрытой энергии наклепа, обеспечивающей минимальную скорость процесса разрушения, т.е. наибольшую прочность при данной температуре и нагружении. Так, у деталей, работающих при невысоких температурах, наклеп ПС, как правило, повышает предел усталости. Согласно экспериментальным данным, увеличение глубины наклепа в процессе обработки резанием стали 45 с 35 до 80 мкм повысило предел выносливости на 8 %. При точении и последующем полировании усталостная прочность повышается на 20...25 % за счет наклепа и на 12...15 % за счет снижения микронеровностей на операции полирования.

Рассматривая влияние пластической деформации ПС на усталостную прочность, необходимо учитывать снижение запаса пластичности металла, что отражается на циклической долговечности, повышает чувствительность к концентраторам напряжений и перегрузкам, снижает реальный запас прочности металла. Вследствие этого для деталей из жаропрочных сталей и сплавов оптимальным (из условий наибольшей усталостной и длительной прочности) будет ПС с незначительным деформационным упрочнением или без упрочнения. После обработки параметры упрочнения должны составлять  $\delta=3...10$  %,  $h=10...20$  мкм. С увеличе-

нием глубины, степени наклепа и базы испытаний возрастает отрицательное влияние поверхностного наклепа на высокотемпературную усталостную прочность.

На рис. 6.65 приведены кривые усталостной прочности образцов из никелевых сплавов ХН70ВМТЮ, ХН70ВМТЮФ и ХН55ВМТФКЮ при температурах 800 и 900 °С после фрезерования, шлифования и обкатки роликом [3]. Видно, что после всех видов обработки с увеличением глубины наклепа от 15 до 160 мкм сопротивление высокотемпературной усталости на базе  $10^6$  циклов снижается на 3...7 %, а на базе  $10^8$  циклов – на 5..17 %.

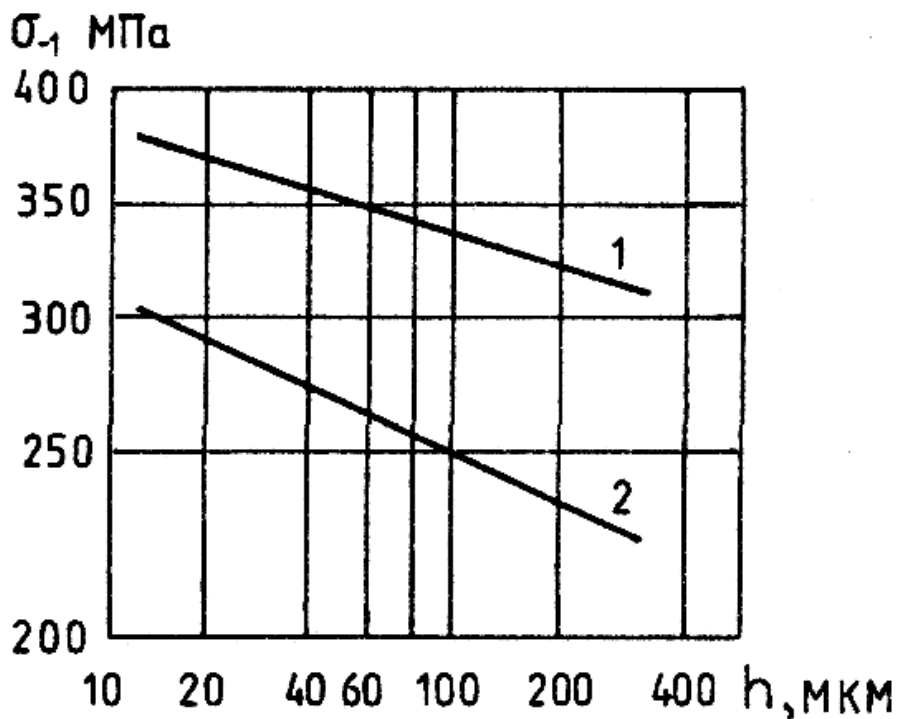


Рис. 6.65 Зависимость предела выносливости от глубины наклепа при обработке никелевых сплавов: 1 –  $N=10^6$  циклов; 2 –  $N=10^8$  циклов

Технологические остаточные напряжения в зависимости от условий работы деталей могут оказывать положительное, отрицательное или несущественное влияние на их эксплуатационные свойства, в частности на усталостную прочность. Характер и степень этого влияния определяется результатом взаимодействия остаточных напряжений с напряжениями от внешних нагрузок, характером приложения этих нагрузок (статическое, динамиче-

ское, циклическое и др.), а также влиянием окружающей среды (температура, степень агрессивности и т.п.) и структурным состоянием материала детали. При статических нагрузках остаточные напряжения практически не влияют на показатели прочности пластичных материалов, так как при появлении небольших пластических деформаций они снимаются. В условиях циклического нагружения при невысокой температуре остаточные напряжения оказывают существенное влияние на усталостную прочность. Иногда остаточные сжимающие напряжения приводят к закрытию «залечиванию» микротрещин в результате диффузионной сварки их краев. Остаточные растягивающие напряжения наоборот способствуют раскрытию макро- и микродефектов, проникновению в поверхностные трещины внешней среды, ускоряя коррозионные процессы, увеличивая напряжения растяжения в вершине трещины за счет расклинивающего действия продуктов коррозии и уменьшая в конечном итоге коррозионно-усталостную прочность и стойкость к коррозионному растрескиванию.

Коррозионная стойкость металлов увеличивается с уменьшением шероховатости поверхности, с увеличением радиусов округления впадин, с уменьшением степени и глубины наклепа, с уменьшением растягивающих остаточных напряжений. Сжимающие остаточные напряжения способствуют замедлению коррозионных процессов.

Установлено, что сжимающие остаточные напряжения сжатия повышают усталостную прочность, а растягивающие напряжения растяжения ее снижают.

Если нагружение материала ПС детали происходит в упругой области, то напряжения в нем представляют собой алгебраическую сумму (суперпозицию) остаточных и рабочих напряжений. Возникает асимметричное нагружение с напряжениями, превышающими рабочие на величину остаточных напряжений. У пластичных материалов предел прочности на растяжение ниже, чем предел прочности на сжатие. Поэтому увеличение растягивающих напряжений приводит к ускорению разрушения при циклических нагружениях.

Вторым существенным фактором положительного влияния остаточных сжимающих напряжений на усталостную прочность является то, что они не дают возможности раскрытия поверхностных дефектов в виде макро- и микротрещин, блокируют отрица-

тельное действие концентраторов напряжений путем перераспределения напряжений у дна надреза. При этом увеличивается инкубационный период до зарождения трещины.

Коррозионно-усталостная прочность снижается при увеличении шероховатости поверхности, деформационного упрочнения и наличии растягивающих остаточных напряжений в ПС. Так, при усталостных испытаниях гладких шлифованных образцов из высокопрочной стали 30ХГСНА в водопроводной воде предел выносливости снизился с 650 до 80...100 МПа, а у образцов из стали ЭИ643 – с 700 до 120 МПа по сравнению с образцами, испытанными на воздухе. Виброшлифование и виброполирование повышают коррозионно-усталостную прочность стали 30ХГСНА с  $\sigma_{-1}=650...760$  МПа до  $\sigma_{-1}=200$  МПа, а после обработки ППД (вибронаклеп, обкатка роликом, алмазное выглаживание) предел выносливости в водопроводной воде был даже выше, чем после шлифования и испытаний образцов на воздухе ( $\sigma_{-1}=650...760$  МПа). Это можно объяснить в основном положительным влиянием сжимающих остаточных напряжений, образовавшихся в результате ППД, а также снижением шероховатости поверхности, особенно после алмазного выглаживания.

Большинство исследователей полагают, что в процессе эксплуатации деталей машин параметры качества поверхностного слоя претерпевают изменения, заключающиеся в изменении параметров шероховатости, уменьшении или увеличении твердости поверхностного слоя, частичной или полной релаксации остаточных напряжений, изменении фазового и структурного состояния, физико-химических свойств.

Так, например, для поверхностей деталей, работающих в легких и средних условиях, в период начального изнашивания высота неровностей  $Rz$  уменьшается на 65...75 % при одновременном увеличении фактической площади их контакта и снижении удельного давления. При этом высота неровностей уменьшается или увеличивается до некоторого оптимального значения, различного для разных условий трения (рис. 6.66).

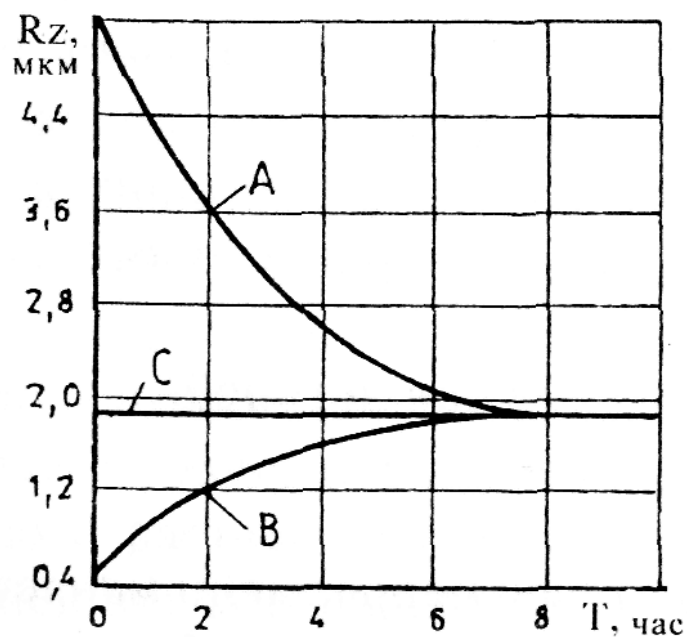


Рис. 6.66 Изменение шероховатости трущихся пар по времени при разной начальной шероховатости: *A* – поверхность с шероховатостью больше оптимальной; *B* – шероховатость меньше оптимальной; *C* – оптимальная шероховатость

При трении происходят микропластические деформации ПС, вызывающие его наклеп и образование эксплуатационных остаточных напряжений. Технологические остаточные напряжения изменяются. Эксперименты показали, что растягивающие остаточные напряжения уже через несколько тысяч циклов переходят в сжимающие напряжения и в дальнейшем практически не изменяют своей величины и знака [8].

При циклических нагрузках (знакопеременном изгибе, изгибе с растяжением или сжатием, сжатии-растяжении) в зависимости от величины остаточных и рабочих напряжений, температуры и циклической наработки исходные остаточные напряжения перераспределяются. В основном они релаксируют (уменьшаются), иногда изменяют знак, т.е. формируются новые остаточные напряжения (эксплуатационные).

Целенаправленное формирование поверхностного слоя заданного качества, исходящего из требований длительной и надежной эксплуатации деталей, обеспечивается путем рационального выбора технологических методов, режимов и условий обработки, упрочнения поверхностей, нанесения покрытий и др.

## 6.10 Технологические методы повышения качества поверхностного слоя и эксплуатационных свойств деталей машин

Требуемые эксплуатационные свойства на стадиях жизненного цикла деталей машин обеспечиваются выбором материала детали и приданием ей требуемой формы и размеров, назначением требуемых параметров точности и качества поверхностного слоя, технологическими методами, обеспечивающими эти заданные показатели, методами контроля качества и др. [8].

Выбор и назначение характеристик качества поверхностного слоя предполагает выполнение анализа технических условий и условий эксплуатации, определение состава и численных значений эксплуатационных свойств детали, определение (назначение, расчет) параметров и выбор методов обработки, обеспечивающих заданное качество поверхностного слоя, расчет режимов и затрат, связанных с реализацией технологических методов.

В основе решения этих задач лежат установленные закономерности влияния качества поверхностного слоя на эксплуатационные свойства, с одной стороны, и технологических режимов на качество поверхностного слоя деталей – с другой.

В машиностроении разработаны и широко используются различные методы технологического воздействия на поверхностный слой деталей с целью обеспечения эксплуатационных свойств: статической и усталостной прочности, поверхностной контактной статической и динамической прочности, коррозионной стойкости, контактной жесткости, герметичности, износостойкости, прочности посадок и др.

Различают *объемное* упрочнение, обеспечивающее примерно одинаковое упрочнение по всему сечению заготовки, и *поверхностное*, при котором осуществляется упрочнение только поверхностного слоя [14].

Объемное упрочнение применяется для повышения характеристик статической прочности деталей, у которых рабочие напряжения распределены по сечению более или менее равномерно. Объемное упрочнение осуществляется, как правило, объемной термической обработкой. Формирование требуемых эксплуатационных свойств деталей при термической обработке достигается правильным выбором материала, скорости и темпера-



туры нагрева, времени выдержки, скорости охлаждения, глубины прокаливаемости, а также сочетанием различных методов термического воздействия.

Большинство деталей машин работают в условиях, при которых эксплуатационная нагрузка (давление, нагрев, действие окружающей среды и т.п.) воспринимается главным образом их поверхностным слоем. Поэтому долговечность таких деталей во многом определяется микрогеометрией и физико-механическим состоянием поверхностного слоя. Для таких деталей используют методы поверхностного упрочнения.

Поверхностное упрочнение деталей может осуществляться двумя путями: *изменением (модификацией) состояния поверхностного слоя или путем нанесения покрытий.*

С физической точки зрения упрочнение металла путем модифицирования представляет собой процесс увеличения дефектов кристаллической структуры (вакансии, внедренные атомы, атомы примеси, дислокации, дефекты упаковки, границы зерен, блоков, субзерен, фрагментов и др.). Увеличение дефектов кристаллической структуры способствует торможению подвижных дислокаций и, как следствие, повышению сопротивления сдвигу. С другой стороны, чрезмерное увеличение дефектов кристаллической структуры металлов может явиться источником большой локальной напряженности в металле и появления в нем поврежденности в виде субмикро-, микро- и макропор и трещин, снижающих эксплуатационные свойства. Упрочнение путем модификации осуществляется *термообработкой, насыщением поверхностного слоя легирующими элементами, пластической деформацией или физическими полями.*

Распространенным методом нагрева деталей под поверхностную термообработку является нагрев токами высокой частоты (ТВЧ), позволяющий получить сочетание высокой твердости поверхности и вязкости сердцевины.

Широкие возможности по упрочнению поверхностного слоя обеспечивают методы, основанные на использовании *концентрированных потоков (КПЭ) энергии.* К КПЭ можно отнести: газовое пламя, плотность мощности потока которого составляет  $10^2 \dots 10^3$  Вт/см<sup>2</sup>, низкотемпературную плазменную струю ( $10^4 \dots 10^5$  Вт/см<sup>2</sup>), ионные пучки ( $10^4$  Вт/см<sup>2</sup>), электрическую дугу ( $10^5 \dots 10^6$  Вт/см<sup>2</sup>),

электронный луч ( $10^7 \dots 10^8$  Вт/см<sup>2</sup>), лазерный луч ( $10^6 \dots 10^{12}$  Вт/см<sup>2</sup>), электрическую искру ( $10^8 \dots 10^9$  Вт/см<sup>2</sup>).

Изменение плотности теплового потока позволяет осуществлять термическую обработку, оплавление, аморфизацию, шоковый удар поверхностного слоя, получая при этом уникальные структуры с высокими физико-механическими свойствами, в том числе имеющие нестабильные фазы и пересыщенные твердые растворы, которые не удастся получить другими методами. Используя КПЭ, можно осуществлять модифицирование поверхностного слоя при атмосферном давлении, в вакууме или в контролируемой атмосфере.

*Насыщение* поверхностного слоя металлами и неметаллами повышает их эксплуатационные свойства за счет увеличения твердости и износостойкости (углерод, азот), жаростойкости (алюминий, хром, кремний) и др. Скорость внедрения атомов легирующих элементов в кристаллическую решетку основного металла увеличивается с ростом температуры и давления. Наряду с традиционными методами химико-термической обработки, осуществляемыми с объемным нагревом деталей, применяются методы лазерного, ионного, электроэрозионного поверхностного легирования, которые позволяют получать специфичные структуры с высокими эксплуатационными свойствами.

*Поверхностное пластическое деформирование* (ППД) применяется с целью деформационного упрочнения металла и создания в поверхностном слое сжимающих остаточных напряжений, а также получения благоприятного профиля шероховатости поверхности. ППД весьма эффективно для повышения сопротивления усталости, особенно для деталей, изготовленных из высокопрочных материалов, имеющих повышенную чувствительность к концентраторам напряжения. Наличие в поверхностном слое сжимающих остаточных напряжений снижает скорость распространения усталостных трещин. Малая шероховатость поверхности, имеющая большой радиус впадин, также способствует снижению концентрации напряжений на поверхности детали. Повышение износостойкости деталей обработкой ППД связано с формированием благоприятного профиля шероховатости, который сочетает хорошую опорную способность с достаточной маслосемкостью поверхности.

Модификация поверхностного слоя *физическими полями* основана на использовании импульсной магнитной обработки, нейтронного облучения и других физических методов, целенаправленно изменяющих тонкую кристаллическую структуру.

*Нанесение покрытий* применяется с целью создания поверхностного слоя, материал которого имеет значительно большую, чем основной материал, износостойкость, коррозионную стойкость, жаростойкость и другие свойства.

Применение покрытий позволяет технологическими способами управлять эксплуатационными свойствами поверхностного слоя, изготавливая деталь из недорогих и недефицитных материалов. Поскольку покрытия увеличивают размер, они применяются также при ремонте деталей.

Наряду с традиционными методами нанесения покрытий – химическими и гальваническими – широкие возможности обеспечивают методы, основанные на использовании КПЭ.

При напылении *газотермическими методами* в атмосфере образуются покрытия толщиной от десятков микрометров до миллиметра и более. Нанесение покрытий в вакууме осуществляется атомами или ионами материала покрытия, которые при встрече с поверхностью детали или внедряются в нее (*ионная имплантация*), или осаждаются на ней и, конденсируясь, образуют тонкий слой покрытия толщиной от долей до нескольких микрометров.

Покрытия, обладающие высокими эксплуатационными свойствами, можно получить методами электроискровой обработки. Достоинство таких покрытий заключается в хорошей адгезии (сцепляемости) с основным металлом и возможности получения сложного по составу покрытия при сравнительно небольших затратах.

Расширение технологических возможностей упрочнения обеспечивают *комбинированные* технологии, основанные на использовании различных по физической сущности методов упрочнения. К комбинированным относятся методы, сочетающие термическую и механическую обработки, нанесение покрытий и диффузионный отжиг, нанесение покрытий и ППД и др. Например, электроэрозионное легирование поверхностного слоя позволяет в несколько раз повысить износостойкость деталей. Однако при этом в поверхностном слое возникают растягивающие остаточные напряжения, снижающие сопротивление усталости. По-

этому для достижения сочетания износостойкости и сопротивления усталости следует деталь дополнительно упрочнить ППД.

Выбор того или иного метода упрочнения должен быть обоснован, с одной стороны, эксплуатационными условиями работы детали, а с другой – экономическими соображениями.

### 6.11 Технологическая наследственность в машиностроении

Явление переноса свойств объектов от предшествующих операций к последующим называется технологическим наследованием, а сохранение этих свойств – технологической наследственностью [21-22].

По всей видимости, данная терминология заимствована из области биологии, где выделяют такие понятия, как наследование, наследственность, наследуемость и др.

Еще в 30-е годы А. П. Соколовский, анализируя точность обработки деталей на металлорежущих станках, обнаружил копирование погрешностей по ходу технологического процесса. Введя понятие «уточнение», он предложил методику расчета точности обработки деталей. В 50-е годы В. М. Кован предлагал проводить размерный анализ от конечной (сборка) к начальной (заготовка) стадиям производства.

К середине 70-х годов XX века существенно возросли требования к надежности деталей машин, что потребовало нового подхода к оценке технологических процессов. Такой подход был разработан А. М. Дальским [21]. Он заключался в оценке взаимосвязей и взаимозависимостей параметров качества, создаваемых на предшествующих и последующих операциях, что и определялось как технологическая наследственность. Носителями наследственной информации, по мнению автора, являются собственно материал высокоточной детали, а также ее поверхности с многообразием параметров, описывающих состояние этих поверхностей. В ходе технологического процесса микротрещины в поверхностном слое могут развиваться или «залечиваться» в зависимости от получаемой наследственной информации (рис. 6.67).

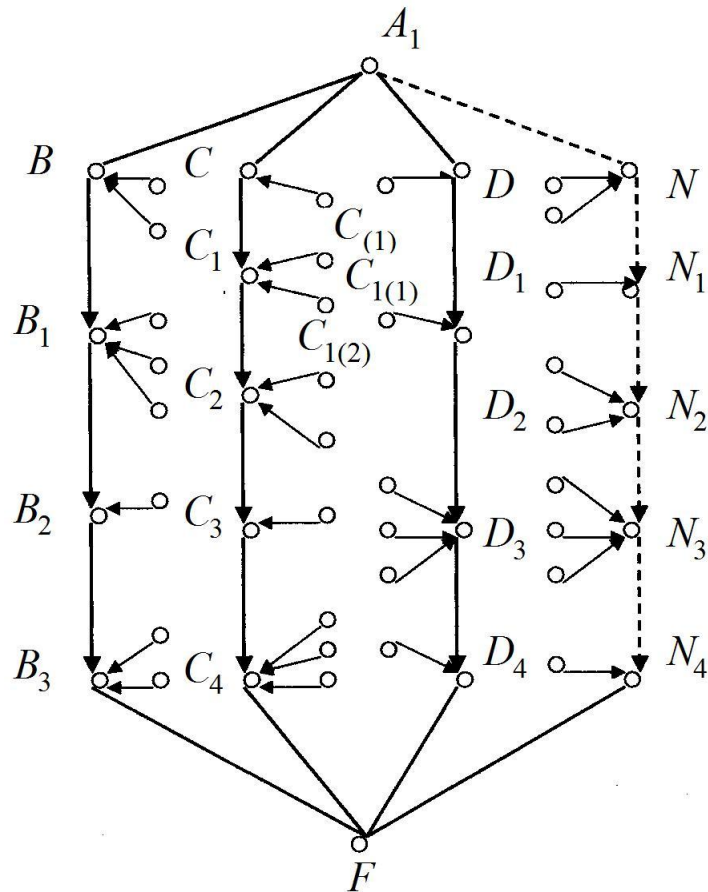


Рис. 6.67. Размерный граф технологического наследования

Комплекс свойств заготовки  $A_1$  представлен конкретными свойствами  $B, C, D, \dots, N$ , каждое из которых претерпевает изменения в ходе технологического процесса. Если принять  $C$  как отклонение формы заготовки, то за счет свойств  $C_{1(1)}$  и других особенностей  $C_{1(2)}, \dots, C_{1(p)}$  операции чистового точения эта погрешность превращается в  $C_1$  и т.д. В конце технологического процесса наследственное отклонение составит  $C_4$ , которое и определит качество  $F$  готовой детали. При этом общее число наследуемых свойств определится одной из сумм:

$$M = \rho(A_1) + \rho(A_2) + \dots + \rho(A_n) = \rho^*(A_1) + \rho^*(A_2) + \dots + \rho^*(A_n),$$

где  $\rho(A_1), \dots, \rho(A_n)$  – число ребер, выходящих из вершин  $A_1, \dots, A_n$  графа;  $\rho^*(A_1), \dots, \rho^*(A_n)$  – число ребер, входящих в эти вершины;  $n$  – число вершин графа.

Рассматриваемые графы сходны с графами генеалогическими и показывают передачу наследственной информации от одно-

го объекта к другому. При этом сами графы могут быть циклическими, имеющими и не имеющими обратных связей.

Наряду с графическим представлением использованы и количественные оценки в виде;

- взаимной корреляционной функции:

$$K_{xy}(t, t') = M \{ [X(t) - m_x(t)] [Y(t') - m_y(t')] \},$$

где  $K_{xy}(t, t')$  – взаимная корреляционная функция связи;  $X(t)$  и  $Y(t')$  – случайные функции в моменты времени  $t$  и  $t'$ ;  $m_x$  и  $m_y$  – математические ожидания соответствующих функций;  $M\{\dots\}$  – корреляционный момент;

- нормированной корреляционной функции:

$$r_x(t, t') = \frac{K_x(t, t')}{\sigma_x(t)\sigma_x(t')},$$

где  $K_x(t, t')$  – корреляционная функция;  $\sigma_x(t)$  и  $\sigma_x(t')$  – средние квадратические отклонения.

Представление технологического процесса в виде системы графов, описывающих операции и соответствующие каждой из них свойства, позволило представить технологическую наследственность в виде системы коэффициентов:

$$k_i = \frac{C_i}{C_{i=n}},$$

где  $k_i$  – коэффициент изменения какого-либо свойства;  $C_i$  – свойство на текущей операции;  $i$  и  $n$  – номер текущей операции и число операций сверх  $i$ , после проведения которых количественно определяется величина данного свойства.

П. И. Ящерицын обосновывает необходимость рассмотрения свойств обработанных поверхностей в зависимости от всей совокупности выполняемых операций [22]. В технологическом процессе существуют своеобразные «барьеры», являющиеся препятствием для некоторых параметров, описывающих поверхностный слой изделия. К ним относят термические (закалка, отпуск, отжиг, нормализация) и упрочняющие (обкатка роликами и шариками, дорнование, алмазное выглаживание и др.) операции. «Все операции технологического процесса следует рассматривать

не изолированно, а во взаимосвязи, так как конечные характеристики обработанных поверхностей формируются под воздействием всего комплекса выполняемых операций». Выделяются положительные и отрицательные факторы технологической наследственности; при проектировании технологических процессов в структуру следует вводить операции, которые создавали бы больше препятствий к прохождению к финишной операции отрицательных факторов.

Подробный анализ проведен на заготовительном кузнечно-штамповочном переделе, оценена роль структурной наследственности металла в формировании эксплуатационных свойств детали. Установлено, что на образование волнистости технологическая наследственность не оказывает никакого влияния, т.е. волнистость не может копироваться с одной операции на другую. Показано, что параметры шероховатости, полученные на черновых операциях, влияют на эксплуатационные качества деталей (рис. 6.68). Обработка 4-х партий деталей, имеющих разную исходную шероховатость, по одинаковой технологии показала, что исходная шероховатость влияет на шероховатость поверхности на черновых и получистовых операциях.

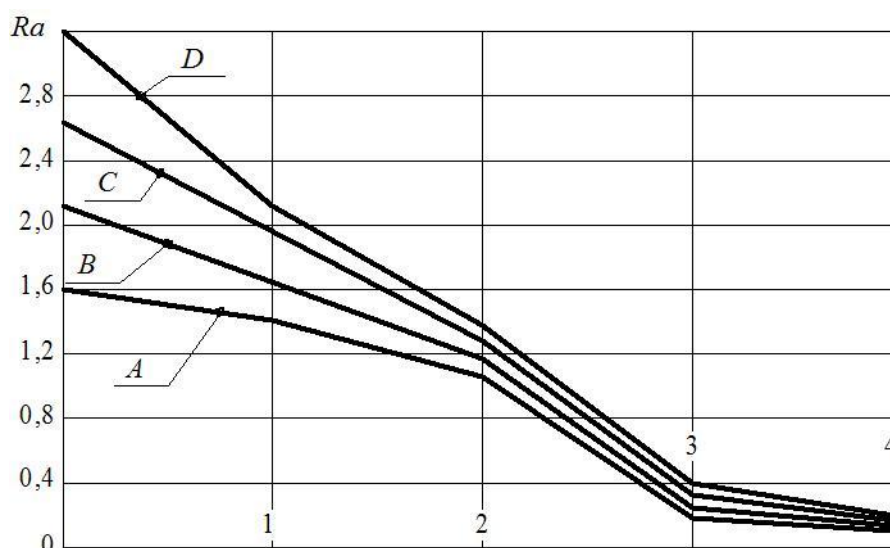


Рис. 6.68 Изменение параметра шероховатости обработанной поверхности  $Ra$ : 1, 2, 3, 4 – соответственно черновое, предварительное, чистовое и окончательное шлифование; A, B, C, D – партии заготовок с различной шероховатостью

Исходная шероховатость влияет на эксплуатационные свойства. Четыре группы образцов одной поставки из стали ШХ15 перед закалкой подвергались механической обработке до различных классов шероховатости. После закалки образцы шлифовались и полировались до одинаковой конечной шероховатости. Анализ показал, что грубая исходная шероховатость привела в итоге к большему контактному выкрашиванию поверхности в процессе испытаний.

Было также показано, что исходная шероховатость влияет и на усталостную прочность деталей машин.

Роль технологической наследственности установлена в отношении упрочнения (наклепа) и остаточных напряжений [22]. Закаленные бочкообразные ролики подвергались последовательному черновому (I), предварительному (II), чистовому (III) и окончательному шлифованию (IV) (рис. 6.69).

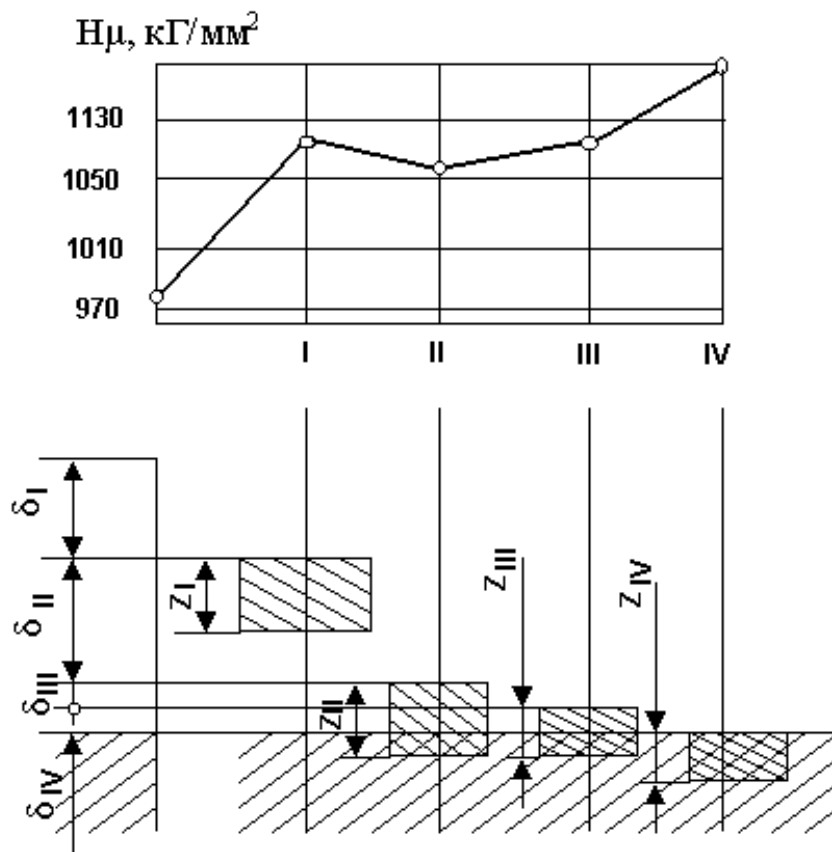


Рис. 6.69 Пооперационное изменение интенсивности наклепа шлифованной поверхности роликов: *a* – изменение величины микротвердости  $H_{\mu}$ ; *b* – расположение полей операционных припусков и зон наклепа



Величины операционных припусков на сторону  $\delta$  соответственно составляли:  $\delta_I = 0,15$ ;  $\delta_{II} = 0,15$ ;  $\delta_{III} = 0,04$  и  $\delta_{IV} = 0,03$  мм. В итоге операционные зоны наклепа составляли:  $z_I = 0,09$ ;  $z_{II} = 0,08$ ;  $z_{III} = 0,04$  и  $z_{IV} = 0,04$  мм. Из рис. 6.69 видно, что наклепанные зоны последних трех операций частично накладываются друг на друга, а окончательно обработанная поверхность (линия АВ) содержит трижды наложенные зоны наклепа.

На рис. 6.70 приведены результаты исследований, показывающие, что результирующая эпюра остаточных напряжений 5 определяется наследственным влиянием остаточных напряжений на предшествующих операциях.

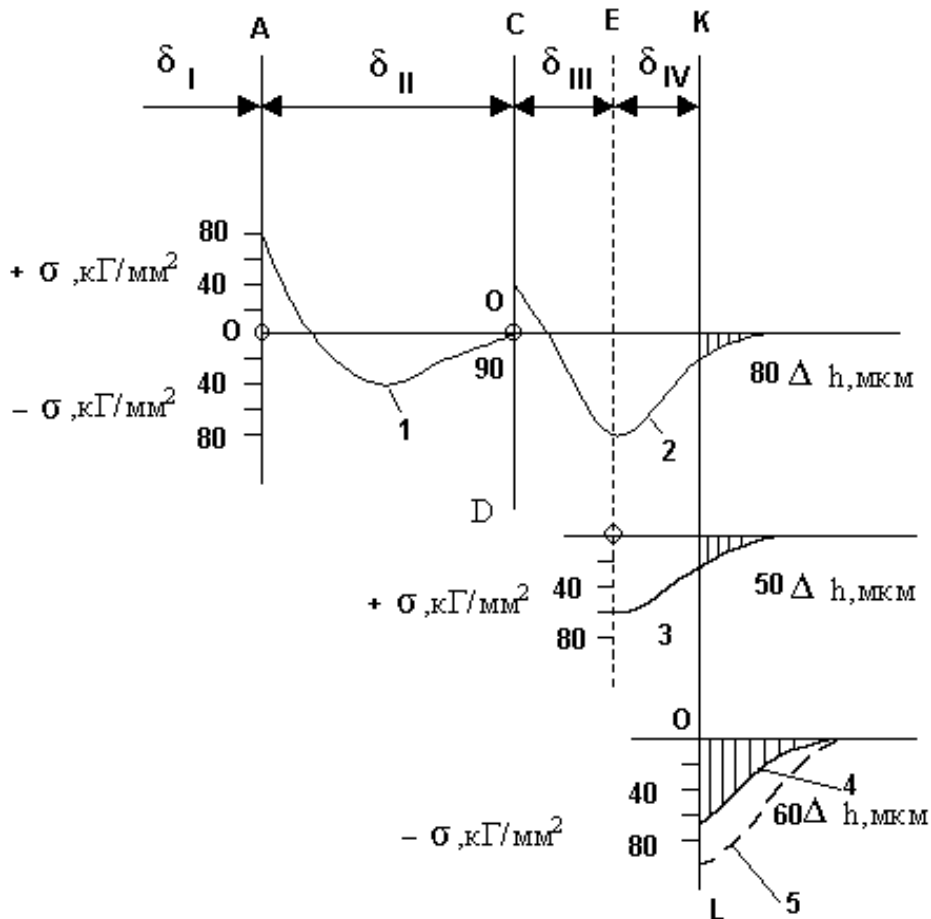


Рис. 6.70 Пооперационное изменение остаточных напряжений в поверхностном слое шлифованных роликов

При обработке ППД установлено, что остаточное напряженное состояние наследуется, если глубина упрочнения на предыдущей операции больше, а степень упрочнения меньше, чем упрочнение от воздействия ППД.

В процессе механической обработки в ряде случаев в поверхностном слое скорости нагрева и охлаждения достигают величин порядка  $(10^5 \dots 10^6)$  и  $(10^3 \dots 10^4)$  град/с, не достижимых при обычной термической обработке. Это приводит к фазовым превращениям и неравномерной твердости (микротвердости) в упрочненных поверхностных слоях изделий. При этом глубина таких слоев и изменение твердости существенно определяются способностью материала изделия к технологическому наследованию.

Исходная шероховатость поверхности оказывает влияние не только на шероховатость поверхности на последующих операциях, но и на твердость и остаточные напряжения, что объясняется как действие так называемых термических ударов (рис. 6.71).

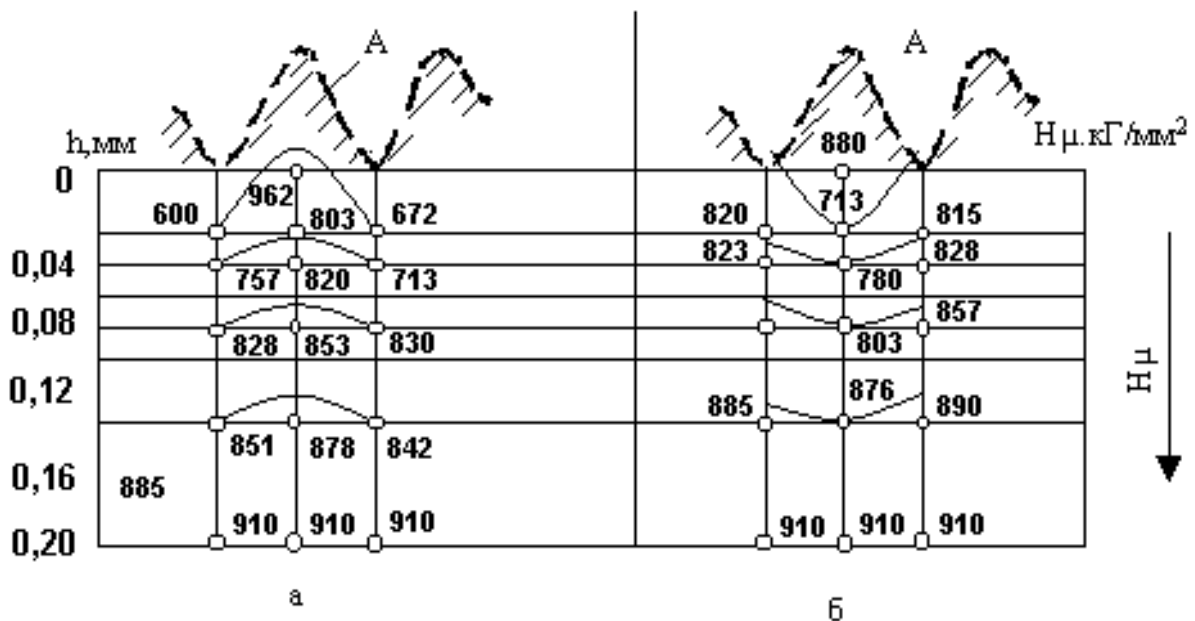


Рис. 6.71 Изменение микротвердости в поверхностных слоях металла в результате действия термических ударов при срезании гребешков (выступов шероховатости): а, б – соответственно форсированное и чистовое шлифование; А – гребешки после токарной обработки

Состояние поверхностного слоя после обработки различными технологическими методами существенным образом влияет как на

характер изменения свойств поверхностного слоя, так и на общую долговечность в процессе работы детали в условиях трения.

Исследования влияния метода обработки, среды испытаний и термической обработки на усталостную прочность образцов позволили установить, что образцы, предварительно обработанные силовым точением, имеют меньшую усталостную прочность, чем образцы после скоростного точения. Это объясняется тем, что после скоростного точения поверхностный слой имеет более равномерное распределение микроструктуры, наклепа и остаточных напряжений (рис. 6.71).

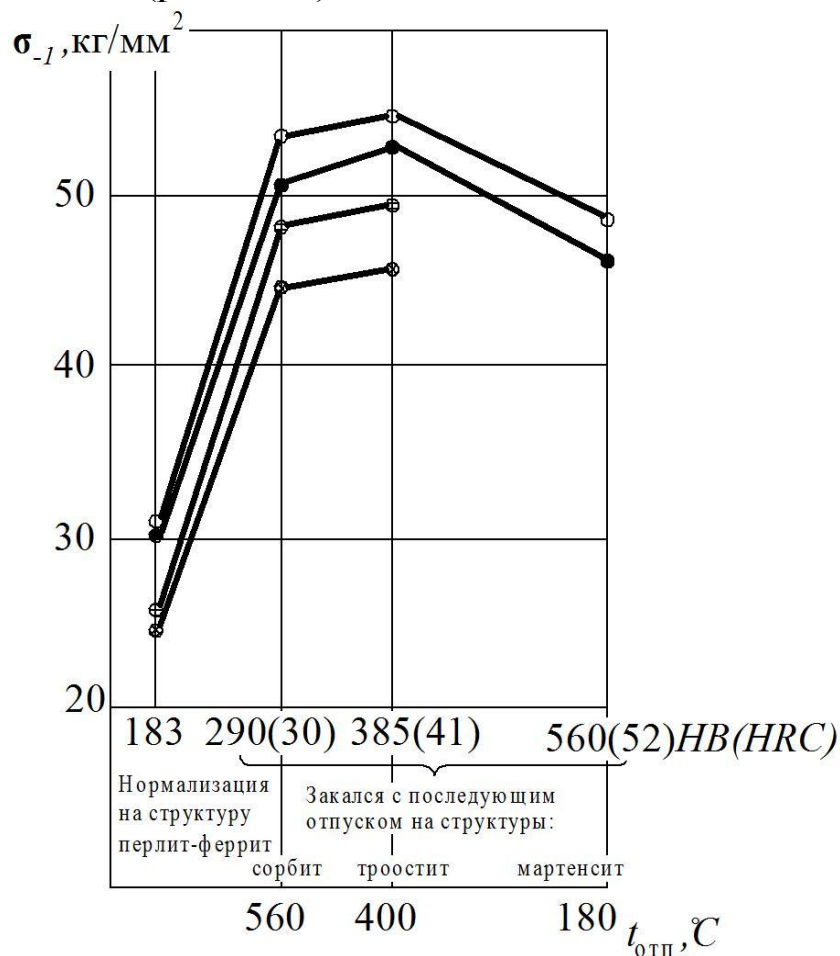


Рис. 6.71 Изменение предела выносливости стали 45 в зависимости от температуры отпуска и технологической наследственности при испытании в воздухе (1, 3) и автотракторном масле (2, 4): 1, 2 – шлифование после скоростного точения; 3, 4 – шлифование после силового точения

Важным является не только выбор метода предварительной обработки, но и оптимальные сочетания механического и термического воздействия на поверхностный слой детали (рис. 6.72).

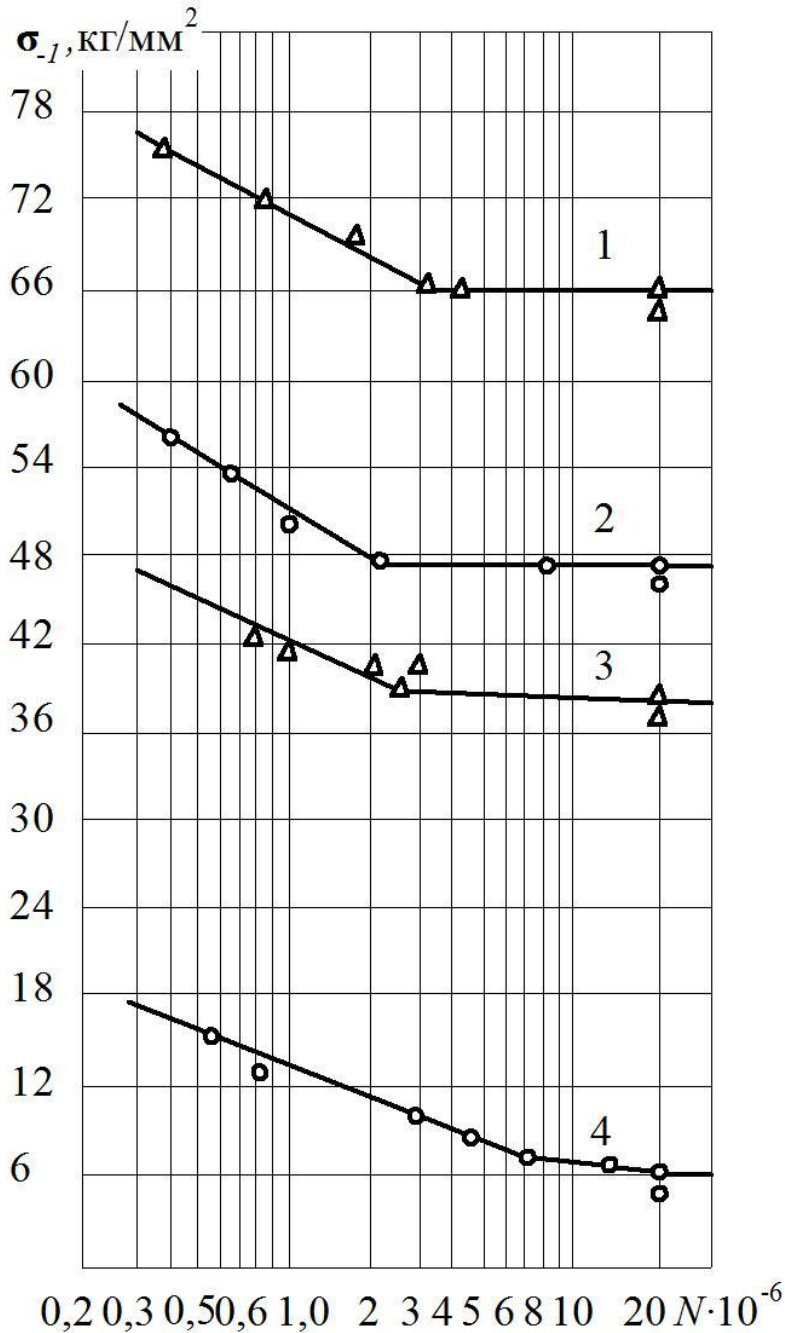


Рис. 6.72. Кривые усталости шлифованных образцов из закаленной стали 40X, испытанных в воздухе (1, 2) и 3 %-ном растворе NaCl (3, 4); 1, 3 – шлифование после точения; 2, 4 – шлифование после термообработки

Технологическое наследование описывают, используя различные термины и категории, основанные, чаще всего, на статистиче-

ских представлениях о закономерностях изучаемых явлений. Так, для описания технологической наследственности используют методы математического планирования экспериментов, аппарат временных рядов и др.

Новым в области технологического наследования является представление о технологических средах как о совокупности технологических объектов, взаимодействующих с выделенным технологическим объектом на отдельном этапе изготовления изделия, к которым относят: заготовку, сборочную единицу, отдельную технологическую операцию или технологический процесс [23]. Средой является все, что не принадлежит выделенному объекту. Под объектами понимают любой из объектов, в результате взаимодействия которых происходит определение или изменение состояния предмета производства при изготовлении изделия.

Поскольку для процессов сохранения и изменения свойств изделия может быть определено желаемое направление, наиболее благоприятное с точки зрения окончательного состава и значений показателей качества, то, по мнению авторов, для каждого этапа технологического процесса изготовления изделия ( $I$ ) может быть сформирована оптимальная технологическая среда, которая, в свою очередь, будет формировать оптимальные фактические свойства  $I$  (рис. 6.73).

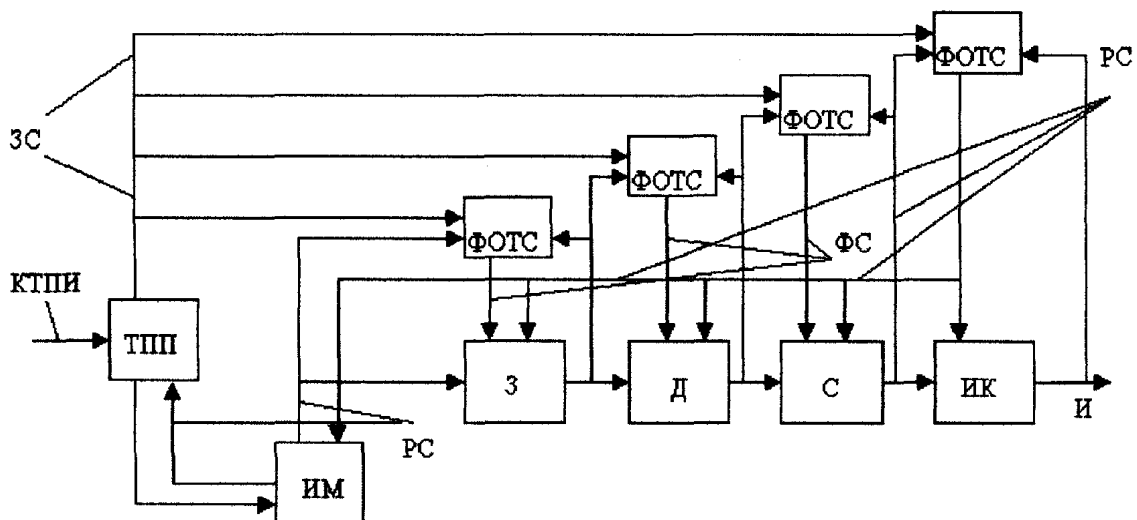


Рис. 6.73 Концептуальная схема направленного формирования оптимальных свойств изделий:  $ЗС$ ,  $РС$ ,  $ФС$  – заданные, реаль-

ные, формируемые свойства *И* соответственно; *ТПП* – технологическая подготовка производства; *ИМ* – изготовление исходных материалов; *З* – изготовление заготовок; *Д* – изготовление деталей; *С* – сборка; *ИК* – испытание и контроль

В соответствии с этой схемой по условиям эксплуатации детали определяются *ЗС*, технологический процесс определяет *РС*, в результате чего при знании закономерностей формирования технологических сред на каждом этапе сквозного процесса изготовления *И* осуществляется формирование оптимальных технологических сред (*ФОТС*), обеспечивающих наиболее оптимальные *ФС*.

Традиционно в технологии машиностроения в этом разделе рассматривается и наследование точностных параметров деталей машин.

Важное значение имеет технологическое наследование конструктивных форм [4]. Если производить протягивание силой *P* отверстия у заготовки, показанной на рис. 6.74, а, то обязательно возникнет отклонение отверстия от цилиндричности, поскольку заготовка имеет в сечениях 1-1 и 2-2 различную жесткость. Сила, действующая со стороны протяжки на заготовку, вызывает в каждом поперечном сечении различные деформации, что приводит к отклонению образующей отверстия от прямолинейности, а поверхности отверстия – от цилиндричности (рис. 6.74, б). У заготовок иных конструктивных форм будут возникать другие отклонения, но связанные с конструктивной формой наружной поверхности заготовок.

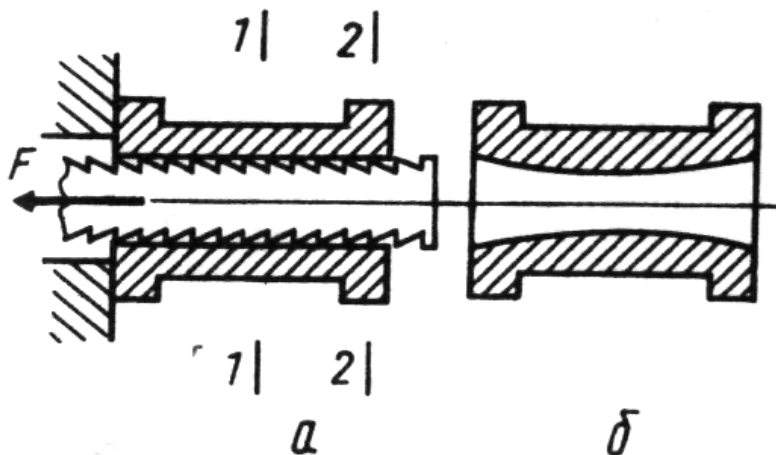


Рис. 6.74 Технологическое наследование конструктивных форм

Зажимные устройства для закрепления заготовок на металлорежущих станках активно участвуют в ходе технологического наследования. В этом можно убедиться, анализируя рис. 6.75, где показаны четыре фазы (I–IV) состояния заготовки типа кольца, установленного в трехкулачковый патрон для растачивания отверстия.

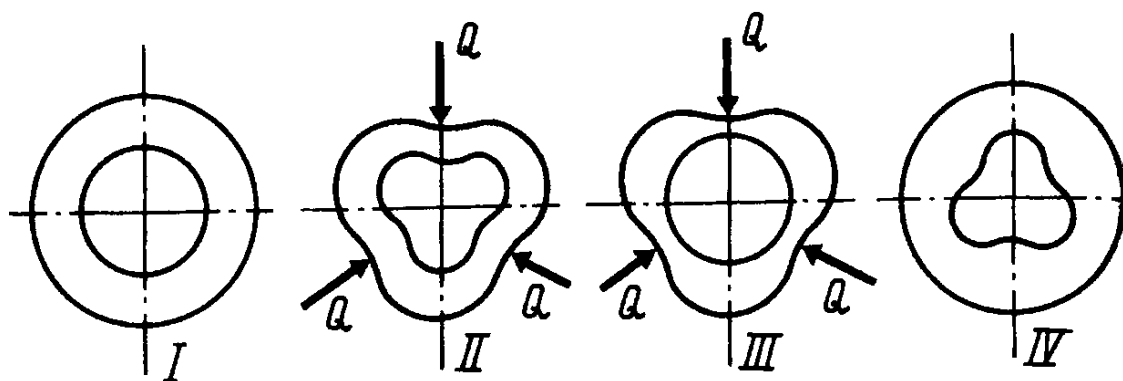


Рис. 6.75 Погрешности формы, вызываемые силами закрепления

На первой фазе заготовка не деформирована, на второй – и наружная, и внутренняя поверхности деформированы силами  $Q$ . После растачивания отверстия (третья фаза) отклонений формы не наблюдается. Точности размера и формы отверстия могут быть весьма высокими. Наружная поверхность деформирована. После раскрепления кольца (четвертая фаза) точность отверстия нарушена (показано утрированно), а наружная поверхность восстановила свою форму.

Отклонение формы растачиваемого отверстия и характер самой погрешности вполне соответствует числу зажимных элементов (кулачков) зажимного патрона. При использовании патронов с двумя кулачками на отверстии возникнет овал, а при использовании четырех кулачков – четыре явно выраженные волны на отверстии детали и т.д.

Решение проблемы технологического наследования всегда связано с отысканием таких условий, при соблюдении которых не возникает наследственного переноса вредных свойств от предшествующих операций к последующим. После бесцентрового шлифования заготовок на их наружной поверхности возникло 18 выступов (рис. 6.76, а, левая круглограмма). Для удаления такой погрешности формы и достижения заданной шероховатости

заготовки подвергали суперфинишированию тремя абразивами. Постоянно отклонение формы уменьшалось, что можно наблюдать по круглограммам, снятым с заготовок через каждые 4 с. Через 20 с со станка снимают качественные детали. Однако если заготовки имеют после предварительной обработки три выступа (рис. 6.76, б, левая круглограмма), то при тех же условиях проведения процесса суперфиниширования погрешность формы увеличивается, что можно видеть из анализа круглограмм.

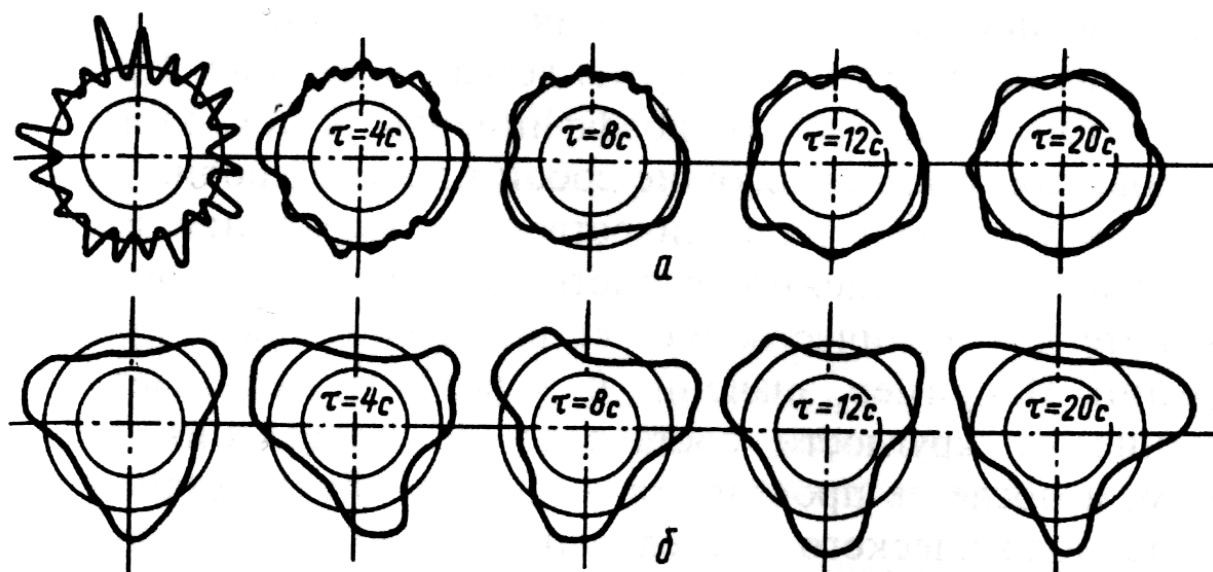


Рис. 6.76 Круглограммы, снятые с детали после суперфиниширования

Важно установить не только качественные, но и количественные характеристики технологического наследования [23]. Именно количественные характеристики позволяют определить, насколько велико влияние технологического наследования данного свойства на надежность работы детали в машине. Проще всего для этого использовать коэффициенты технологического наследования, представляющие собой простые дроби, у которых числитель указывает на количественное выражение величины, отражающей определенное свойство до проведения операции, а знаменатель – количественное ее выражение после проведения операции.

В заключение данного подраздела отметим следующее.



1. В настоящее время не вызывает сомнения необходимость учета технологического наследования при исследовании существующих и проектировании новых технологических процессов.

2. Качество детали формируется на протяжении всей ее технологической предыстории. Множество показателей качества (свойств) детали является результатом технологической предыстории.

3. Любое (технологическое и связанное с ним) воздействие на заготовку изменяет все показатели качества (свойства) заготовки.

4. Любой показатель качества, изменяясь, изменяет все остальные показатели качества (свойства) заготовки.

Учет технологического наследования при проектировании маршрута упрочняющей механической обработки и оценке долговечности деталей предполагает раскрытие и использование функциональных связей параметров состояния поверхностного слоя с параметрами эксплуатации, что требует выполнения анализа процесса формирования этого состояния на всех стадиях жизненного цикла детали.

Раскрытие физических наследственных закономерностей проведено на основе использования разработанного аппарата механики технологического наследования [24]. Сущность этого подхода заключается в том, что физическое состояние поверхностного слоя определяется как результат пластического течения металла в очаге деформации, протекающего в условиях сложного напряженно-деформированного состояния. В связи с таким подходом наряду с традиционными параметрами состояния поверхностного слоя: шероховатостью, волнистостью, твердостью, остаточными напряжениями, используются известные из механики деформирования параметры, такие как степень деформации сдвига и степень исчерпания запаса пластичности. При этом появилась возможность описать протекающие в поверхностном слое процессы в форме, удобной для инженерного пользования.

## 7 ОСНОВЫ СНИЖЕНИЯ СЕБЕСТОИМОСТИ МАШИН

Как было сказано ранее, перед технологией машиностроения, как наукой, стоит две задачи:

- техническая – обеспечение требуемого качества машин;
- экономическая – изготовление машин заданного качества при минимальных затратах на производство. Этот раздел посвящен решению второй задачи.

*Себестоимость* – это затраты живого и овеществленного труда на изготовление машины, выраженные в денежной форме.

Затраты овеществленного труда – это затраты на материалы, комплектующие изделия, оборудование, содержание зданий и т.п. Затраты «живого» труда – заработная плата рабочих.

Для определения затрат живого труда используется понятие «трудоемкость».

*Трудоемкость* – количество времени, затрачиваемое рабочим определенной квалификации в определенных производственных условиях на выполнение той или иной работы. Трудоемкость измеряется в *нормочасах*. Различают фактическую и нормативную трудоемкость. Для определения трудоемкости используется понятие «*норма времени*».

### 7.1 Основы технического нормирования

В соответствии с ГОСТ 3.1109–82 техническое нормирование – это установление технически обоснованных норм расхода производственных ресурсов – энергии, сырья, материалов, инструмента, рабочего времени и т.д.

Одна из основных задач нормирования – определение меры труда.

Нормирование труда производится двумя методами:

- опытно-статистический метод;
- расчетно-аналитический метод.

При опытно–статистическом методе нормирования норма времени устанавливается на всю операцию в целом путем сравнения с нормами и фактической трудоемкостью аналогичной работы, выполненной ранее. Основой метода являются статисти-

ческие данные о трудоемкости аналогичных операций в прошлом и личный опыт нормировщика.

Опытно-статистические нормы не имеют под собой технической базы, являются заниженными и не отвечают интересам повышения производительности труда.

Достоинство этого метода – простота нормирования. Этот метод нормирования используется в мелкосерийном и единичном производстве.

Расчетно-аналитический метод нормирования труда основывается на технически-обоснованных нормативах. К его достоинствам относятся: тщательный анализ технологических операций, учет передового опыта и техники нормирования. Это основной метод нормирования массового и серийного производства. Недостаток метода – его высокая трудоемкость.

Затраты времени в течение рабочего дня подразделяются:

- на нормируемые – затраты, необходимые для выполнения заданной работы и подлежащие включению в норму времени;
- ненормируемые – потери рабочего времени.

*Техническое нормирование труда* – совокупность методов и приемов по выявлению резервов рабочего времени и установлению необходимой меры труда.

Техническое нормирование производится следующим образом:

1) технологическая операция расчленяется на элементы – приемы:

- машинные;
- машинно-ручные;
- ручные;

2) каждый элемент подвергается анализу с целью рационализации;

3) определяется время выполнения каждого приема;

4) норма времени определяется суммированием времен выполнения отдельных элементов.

Нормирование затрат труда производится назначением нормы времени на технологические операции.

*Норма времени* – регламентированное время выполнения определенного объема работ в определенных производственных условиях одним или несколькими исполнителями определенной квалификации.

Норма времени устанавливается на операцию, называется нормой штучно-калькуляционного времени  $t_{шт-к}$  и измеряется в минутах:

$$t_{шт-к} = t_{шт} + \frac{T_{пз}}{n},$$

где  $\frac{T_{пз}}{n}$  – часть подготовительно-заключительного времени, приходящаяся на одно изделие: здесь  $T_{пз}$  – норма подготовительно-заключительного времени,  $n$  – размер партии изделий.

Норма подготовительно-заключительного времени  $T_{пз}$  определяет время на подготовку рабочего и средств производства к выполнению операции и на приведение рабочего места в исходное состояние после выполнения операции.

Сюда входят затраты времени на следующие виды работ:

- получение наряда на работу;
- ознакомление с работой, технологической документацией, чертежом, получение инструктажа;
- получение технологической оснастки и заготовок на складах;
- установка технологической оснастки на оборудовании;
- наладка оборудования на соответствующий режим работы;
- снятие технологической оснастки с оборудования и сдача на склад;
- сдача готовой продукции и остатков материалов;
- уборка рабочего места.

Подготовительно-заключительное время затрачивается один раз на всю партию деталей, обрабатываемых без переналадки, и не зависит от величины партии, поэтому для того, чтобы определить часть этого времени, приходящуюся на одно изделие, эту норму времени делят на размер партии  $n$ .

Второй элемент нормы штучно-калькуляционного времени  $t_{шт}$  – норма штучного времени – это норма времени на выполнение объема работы, равной единице нормирования: это время, непосредственно затрачиваемое на выполнение данной операции.

$$t_{шт} = t_o + t_b + t_{обс} + t_{отд}.$$

Здесь  $t_0$  – норма основного времени – это норма времени на достижение непосредственной цели данной технологической операции по качественному изменению предмета труда. Это время, в течение которого производится изменение размеров и формы поверхностей заготовки, их шероховатости и т.п., изменение состава и положения элементов сборочной единицы. Если все эти изменения производятся с помощью оборудования – станка и т.п., это время называется машинным.

Тогда

$$t_0 = t_m = \frac{(L + l_{\text{вр}} + l_{\text{пер}}) \cdot i}{S_{\text{мин}}} = \frac{(L + l_{\text{вр}} + l_{\text{пер}}) \cdot i}{S_o n},$$

где  $L$  – длина обрабатываемой поверхности, мм;  $l_{\text{вр}}$  – длина врезания инструмента, мм;  $l_{\text{пер}}$  – длина перебега инструмента, мм;  $(L + l_{\text{вр}} + l_{\text{пер}})$  – длина рабочего хода инструмента, мм;  $S_{\text{мин}}$  – минутная подача режущего инструмента, мм/мин;  $S_o$  – оборотная подача режущего инструмента, мм/об;  $n$  – частота вращения шпинделя станка, об/мин.

Второй элемент  $t_b$  – норма вспомогательного времени – норма времени на осуществление действий, создающих возможность выполнения основной работы, являющейся целью технологической операции, и *повторяющихся с каждым изделием*.

Это время на все приемы, сопутствующие изменениям состояния детали, повторяющиеся при обработке каждой детали. Сюда входит время на следующие приемы:

- установку и снятие заготовки;
- пуск и выключение станка;
- подвод и отвод режущего инструмента;
- перемещения стола или суппорта станка;
- измерения детали на рабочем месте;
- смену или переустановку инструмента, если она производится на каждую деталь;
- изменение режима работы станка.

В норму вспомогательного времени входит время на приемы, выполняемые на неработающем станке. Если прием выполняется во время обработки детали, то время на него не входит в  $t_b$ , оно перекрывается нормой основного времени.

Сумма основного и вспомогательного времени представляет собой норму оперативного времени

$$t_{\text{оп}} = t_{\text{o}} + t_{\text{в}}.$$

Элемент  $t_{\text{обс}}$  – норма времени на обслуживание рабочего места. Это часть штучного времени, затрачиваемая исполнителем на поддержание средств технологического оснащения в работоспособном состоянии и уход за рабочим местом.

Сюда входит время, затрачиваемое рабочим на техническое обслуживание оборудования и оснастки: смену затупившегося инструмента, регулировку и подналадку станка в течение работы, уборку стружки с рабочих органов станка и приспособления, и время на организационное обслуживание рабочего места: время на смазку и чистку станка, приведение в порядок рабочего места, удаление стружки с рабочего места, удаление готовых деталей и размещение заготовок на рабочем месте.

Четвертый элемент нормы штучного времени  $t_{\text{отд}}$  – норма времени на отдых рабочего. Это часть нормы штучного времени, затрачиваемая на отдых, *регламентированный условиями труда*, и личные потребности рабочего. Сюда не входит время вынужденных простоев.

При установлении нормы штучно-калькуляционного времени ее элементы определяются следующим образом.

Норма основного (машинного) времени определяется по приведенной выше формуле в зависимости от длины рабочего хода режущего инструмента и режимов резания.

Нормирование ручных приемов (определение  $t_{\text{в}}$  и  $T_{\text{пз}}$ ), производится по нормативам – документам, имеющим силу закона и обязательным к применению на данном предприятии. Для этого используются «Общемашиностроительные нормативы станочных и ручных работ», разработанные в 80-х годах XX века для различных методов обработки и типов производства, либо нормативы, разработанные самим предприятием. При этом при массовом типе производства при коэффициенте закрепления операций, равном единице, размер партии  $n$  возрастает до величины годового выпуска изделий. В этом случае доля  $T_{\text{пз}}$ , приходящаяся на одно изделие, ничтожно мала. Поэтому в структуре нормы

штучно-калькуляционного времени  $t_{шт-к}$  доля подготовительно-заключительного времени, приходящаяся на одно изделие, отсутствует и  $t_{шт-к} = t_{шт}$ .

Нормы времени на обслуживание рабочего места  $t_{обс}$  и на отдых рабочего  $t_{отд}$  назначаются в зависимости от нормы оперативного времени  $t_{оп}$ . При этом

$$t_{обс} = 3 - 5 \% t_{оп}, \quad t_{отд} = 2 - 3 \% t_{оп}.$$

Разработка нормативов  $t_b$  и  $T_{пз}$  базируется на обработке статистического материала по данным производства, при этом используется один из двух методов.

1. *Хронометраж*. При этом методе технологическая операция разделяется на ряд продуманных рабочих приемов. Хронометрист, стоя рядом с рабочим, секундомером многократно замеряет время выполнения этих приемов. Далее рассчитывается среднее время выполнения каждого приема. Норма  $t_b$  или  $T_{пз}$  на операцию определяется суммированием средних времен выполнения рабочих приемов. Метод имеет следующие недостатки:

– искусственное деление технологической операции на рабочие приемы приводит к завышению норм  $t_b$  и  $T_{пз}$ , поскольку опытный рабочий в реальных условиях может выполнять по несколько приемов одновременно;

– рабочий знает, что производится хронометраж, и, как правило, не стремится к увеличению производительности своего труда, что опять же приводит к завышению норм  $t_b$  и  $T_{пз}$ .

2. *Фотография рабочего времени*. При этом методе рабочий выполняет свою работу в режиме реального времени и не знает, что производится замер времени выполнения всех его действий, включая перерывы в работе, отдых, и т.п. Наблюдение ведется в течение нескольких смен, затем данные анализируются, обрабатываются и определяются реальные величины  $t_b$  и  $T_{пз}$  на операцию. При высокой достоверности полученных норм недостатком метода является его большая трудоемкость.

В заключение необходимо отметить, что нормативы времени фиксируют достигнутый уровень производительности, и поэтому являются консервативными по своей природе.

## 7.2 Определение экономической эффективности технологических процессов

Как правило, может быть разработано несколько вариантов технологических процессов, обеспечивающих требуемую точность и производительность обработки детали.

Для выбора окончательного варианта используется один из двух критериев экономичности технологических процессов – себестоимость изделия или производительность его изготовления.

*Себестоимость* – это затраты живого и овеществленного труда, выраженные в денежной форме. При этом затраты живого труда – это затраты на заработную плату работников, а затраты овеществленного труда – это стоимость материалов, энергии, оснастки, оборудования и т.п., частично относимые на себестоимость изделия. В машиностроении используются два метода определения себестоимости.

1. *Бухгалтерский метод.* Себестоимость  $C$  определяется как

$$C = M + L + Z,$$

где  $M$  – затраты на материалы и комплектующие;  $L$  – затраты на заработную плату основных рабочих;  $Z$  – накладные расходы на заработную плату.

Метод прост, но его недостаток заключается в том, что метод не позволяет определить влияние отдельных факторов, действующих в производстве, на себестоимость изделия.

2. *Метод прямого расчета составляющих себестоимости.*

Калькуляция себестоимости  $C$  ведется по элементам затрат

$$C = \sum_{i=1}^I M_i + \sum_{j=1}^J \left[ O_j + П_j + И_j + \left( 1 + \frac{a_1 + a_3}{100} \right) Z_j \right],$$

где  $i$  – номер марки материала или комплектующего изделия;  $\sum_{i=1}^I M_i$  – затраты на материалы и комплектующие на единицу продукции;  $j$  – номер технологической операции;  $O_j$  – расходы на амортизацию и поддержание оборудования;  $П_j$  – расходы на амортизацию и содержание приспособлений;  $И_j$  – расходы на амортизацию и содержание инструмента;  $Z_j$  – затраты на заработную плату основных рабочих;



$a_1$  – процент отчислений в социальные фонды;  $a_3$  – процент накладных расходов на заработную плату.

Все расходы на производство можно разделить на две части:

– расходы, не зависящие от технологии изготовления изделия, например затраты на материалы и комплектующие на единицу продукции;

– расходы, зависящие от технологии изготовления изделия, такие как расходы на амортизацию и поддержание оборудования, амортизацию и содержанию приспособлений, инструмента, а также затраты на заработную плату основных рабочих.

Для выбора экономичного варианта техпроцесса достаточно рассмотрения второй группы расходов, так называемой *технологической себестоимости*, т.е. части цеховой себестоимости продукции, зависящей от технологического процесса ее изготовления.

*Производительность* определяется количеством продукции, выпускаемой в единицу времени, или нормой выработки

$$Q = \frac{1}{t_{\text{шт-к}}}.$$

При калькуляции себестоимости нормы времени  $t_{\text{шт-к}}$  на технологические операции являются основой для определения затрат на заработную плату основных рабочих, следовательно, эти нормы сами по себе являются критерием экономичности технологического процесса. Следовательно, производительность – это частный критерий, не учитывающий других факторов, влияющих на затраты производства.

Для определения производительности технологических процессов используется трудоемкость изготовления всего изделия:

$$T = \sum_{i=1}^I t_{\text{шт-к}_i},$$

где  $i$  – номер операции технологического процесса.

Трудоемкость изготовления партии из  $n$  изделий для каждой технологической операции определится из выражения

$$T_{\text{партии}} = t_{\text{шт}} \cdot n + T_{\text{пз}}.$$

### 7.2.1 Выбор экономического варианта технологического процесса

*Выбор по критерию себестоимости* может быть произведен двумя методами.

#### 1. Графоаналитический метод.

При калькуляции себестоимости все затраты производства можно разделить на две группы:  $A$  – расходы, не зависящие от программы  $N$  выпуска изделий;  $B$  – расходы, зависящие от программы выпуска изделий. В этом случае себестоимость изделия определится как сумма

$$C = A + B \cdot N.$$

Для различных технологических процессов величины  $A$  и  $B$  будут различны:

$$C_1 = A_1 + B_1 \cdot N; C_2 = A_2 + B_2 \cdot N \text{ и т.д.}$$

Графоаналитический метод включает два этапа:

а) определение составляющих себестоимости  $A_1, A_2, \dots, A_n, B_1, B_2, \dots, B_n$ .

б) построение графика в осях  $C$  – себестоимость,  $N$  – программа выпуска изделия (рис. 7.1).

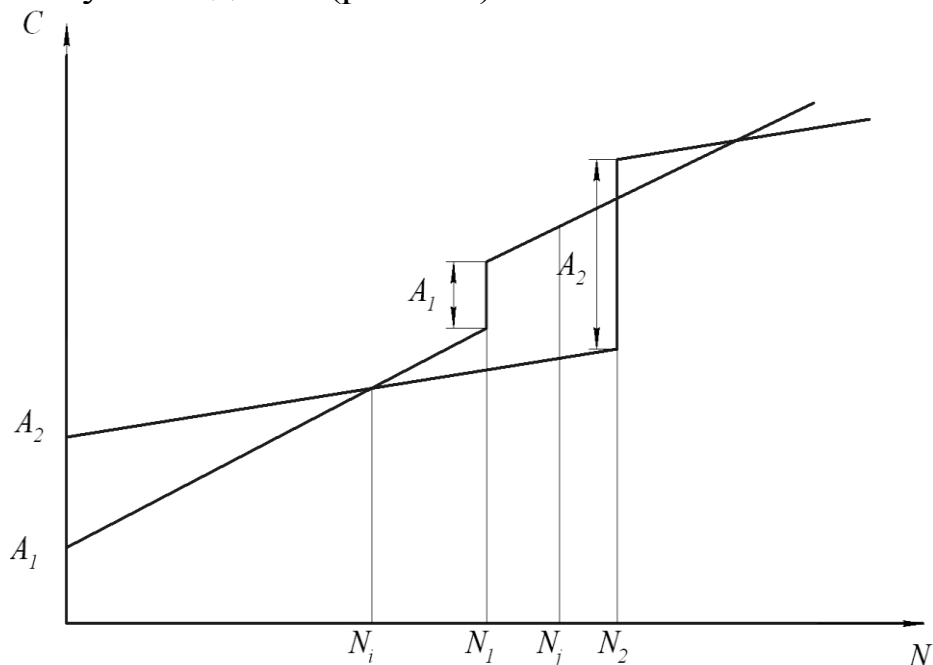


Рис. 7.1 Выбор экономического варианта технологического процесса графоаналитическим методом

По достижении программы выпуска  $N_1$  по первому варианту технологического процесса станок стоимостью  $A_1$  достиг предела

своей производительности (см. рис. 7.1), и для наращивания объема выпуска возникла необходимость в покупке второго такого станка. По второму варианту технологического процесса первоначальная стоимость станка  $A_2$  выше, чем по первому ( $A_1$ ), но производительность станка больше, поэтому необходимость в покупке нового станка возникает при бóльшем значении программы выпуска  $N_2$ . По этому графику можно судить об экономичности того или другого варианта. Так, при величине программы выпуска изделий  $N_i$  более экономичным представляется первый вариант, при величине программы выпуска  $N_j$  – второй вариант технологического процесса.

## 2. Расчетно-аналитический метод.

Определение экономической эффективности производится на основании расчета приведенных затрат

$$Z = C \cdot N + E_n \cdot k,$$

где  $C$  – себестоимость изготовления одного изделия, определенная по элементам затрат;  $N$  – программа выпуска изделий;  $k$  – капитальные вложения на реализацию технологического процесса;  $E_n$  – нормативный коэффициент окупаемости капитальных затрат:

$$E_n = \frac{1}{T},$$

где  $T$  – срок окупаемости капитальных затрат.

При этом методе определяется величина приведенных затрат по каждому варианту технологического процесса

$$Z_1 = C_1 \cdot N + E_n \cdot k_1; Z_2 = C_2 \cdot N + E_n \cdot k_2 \text{ и т.д.,}$$

и затем определяется вариант технологического процесса, требующий минимальных приведенных затрат.

*Выбор по критерию производительности.* По этому критерию оценивается производительность различных вариантов выполнения определенной операции путем расчета трудоемкости обработки партии деталей на данной операции.

Для различных вариантов операции определяется трудоемкость обработки партии из  $n$  деталей

$$T_{\text{парт.1}} = t_{\text{шт.1}} \cdot n + T_{\text{пз.1}}; T_{\text{парт.2}} = t_{\text{шт.2}} \cdot n + T_{\text{пз.2}}.$$

Далее строится график зависимости трудоемкости обработки партии деталей от размера партии для двух вариантов выполнения операции (рис. 7.2)/

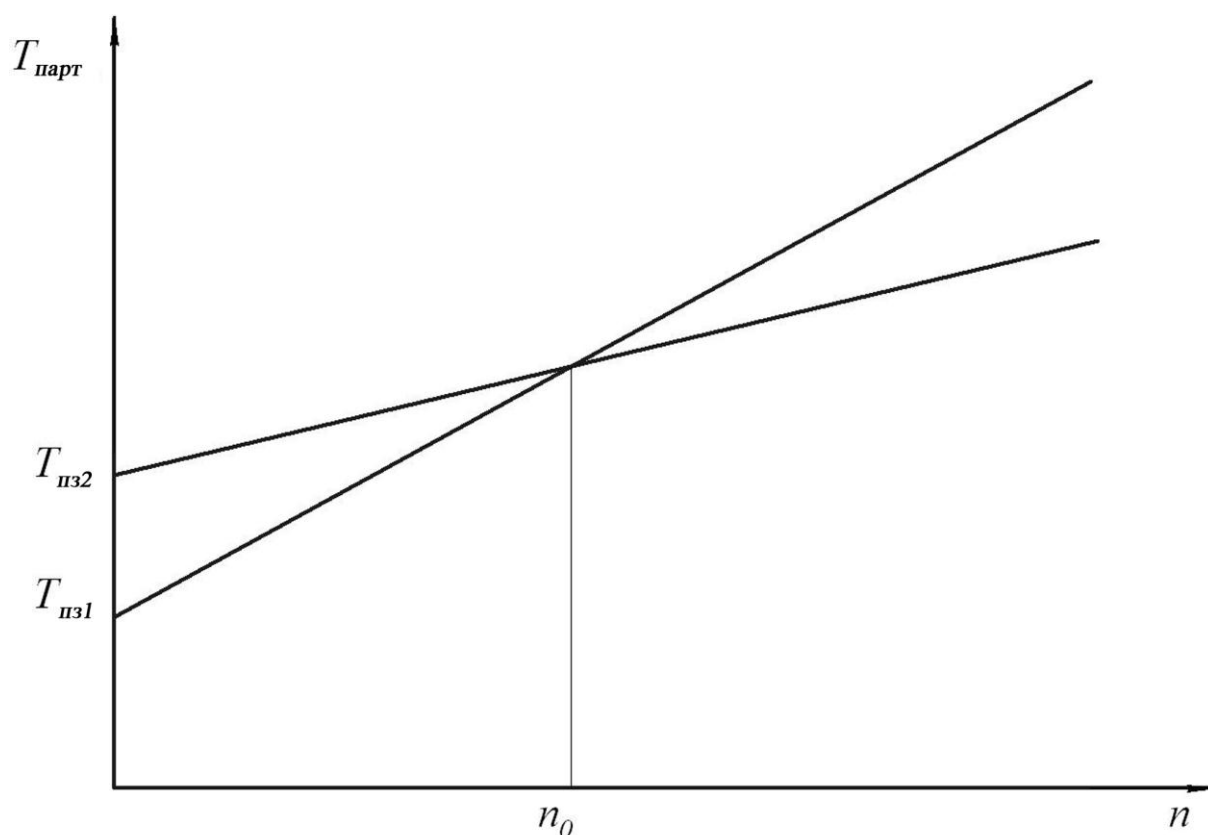


Рис. 7.2 Выбор варианта выполнения операции по производительности

В соответствии с графиком (см. рис. 7.2) при размере партии изделий  $n < n_0$  более эффективным представляется первый вариант выполнения операции, при  $n > n_0$  – второй вариант. При размере партии  $n = n_0$  варианты выполнения операции равноценны.

### 7.3 Технологические методы снижения себестоимости изделий

Главный фактор, определяющий величину себестоимости изделий, – количество машин данной модели, подлежащих изготовлению:

- в единицу времени (месяц, год, смену);
- в течение длительного времени по неизменяемым чертежам.

Количество машин, изготавливаемых в единицу времени (производительность), зависит от потребностей рынка.

Количество машин, изготавливаемых в течение длительного времени по неизменяемым чертежам, определяется моральным износом машины.

*Моральный износ* – потеря машиной возможности экономично выполнять свое служебное назначение по сравнению с новой машиной того же назначения, имеющей более высокие технико-экономические показатели. Это означает, что для «старой» машины моральный износ не наступит до тех пор, пока «новая» машина с более высокими техническими показателями будет иметь стоимость, значительно превышающую стоимость «старой» машины. Таким образом, в основе морального износа находится экономика.

С увеличением количества выпускаемых машин меняется структура себестоимости:

- снижается доля затрат живого труда;
- увеличивается доля затрат овеществленного труда.

Причина в том, что с увеличением количества выпускаемых машин возникает необходимость использования более дорогого и более производительного автоматического оборудования, инструмента, оснастки. В результате снижается трудоемкость изготовления машины и, следовательно, ее себестоимость (рис. 7.3).

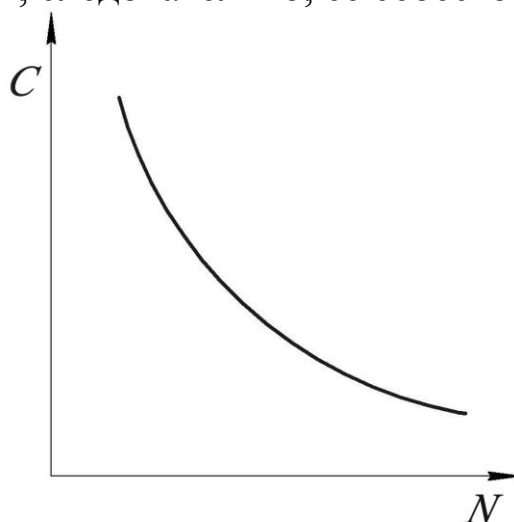


Рис. 7.3 Зависимость себестоимости от количества выпускаемых машин

Таким образом, главное мероприятие, способствующее снижению себестоимости изделия, – увеличение количества выпускаемых изделий, как в единицу времени, так и в течение длительного времени по неизменяемым чертежам.

*Способы увеличения количества выпускаемых изделий:*

1. Разработка конструкций изделий с минимальным моральным износом, – т.е. соответствующих последним достижениям науки и техники в своей области.

2. Унификация конструкций узлов на основе конструктивной преемственности – использование в различных машинах одних и тех же узлов и деталей (гидроаппаратура, электрооборудование, подшипники и т.п.).

*Унификация* – главное средство увеличения количества выпускаемых изделий. Она дает возможность организовать специализированные производства по выпуску унифицированных изделий – специальные цеха, заводы (например, подшипниковые заводы), с использованием наиболее прогрессивных и производительных технологических процессов изготовления этих изделий.

*Нормализация* элементов деталей, подлежащих механической обработке, – диаметров отверстий, резьб, шпоночных пазов, и т.п. позволяет сократить номенклатуру режущего и мерительного инструмента для обработки и, следовательно, организовать специализированные производства различных типов режущего инструмента.

Таким образом, унификация и нормализация конструкций деталей и узлов способствует снижению себестоимости изделий.

### 7.3.1 Сокращение расходов на материалы

Расходы на материалы при изготовлении изделий определяются следующим образом:

$$\sum_{i=1}^I M_i = \sum_{i=1}^I G_i \cdot Q_i - \sum_{i=1}^I g_i \cdot q_i,$$

где  $G_i$  – масса заготовок  $i$ -го материала;  $Q_i$  – стоимость заготовок;  $g_i$  – масса отходов;  $q_i$  – стоимость отходов.

В соответствии с этим выражением возможны три пути сокращения расходов на материалы.

1. Сокращение массы материалов, расходуемых на изготовление изделия:

$$\sum_{i=1}^I G_i \rightarrow \min .$$

2. Использование по возможности более дешевых материалов для изготовления изделия

$$Q_i \rightarrow \min .$$

3. Получение отходов материалов в наиболее ценном виде с целью их последующего использования для изготовления других изделий

$$q_i \rightarrow \max .$$

*Сокращение массы материалов, расходуемых на изготовление изделия, возможно по следующим направлениям.*

1. Совершенствование конструкций и методов расчета изделий, что позволит уменьшить коэффициенты запаса при расчетах, и, тем самым сократить массу машины.

2. Повышение однородности свойств материалов, что позволит сократить брак при получении заготовок и уменьшить разброс массы заготовок.

3. Сокращение отходов и потерь материала как на этапе получения заготовки, так и на этапе механической обработки.

Для определения рациональности использования материала служит коэффициент использования материала

$$K_{\text{им}} = \frac{G_3}{G_{\text{д}}},$$

где  $G_3$  – масса заготовки;  $G_{\text{д}}$  – масса готовой детали (изделия).

Чем ближе  $K_{\text{им}}$  к единице, тем рациональнее используется материал. Возможные пути увеличения  $K_{\text{им}}$ :

- сокращение этапов переработки сырья и материала;
- повышение качества заготовок путем приближения размеров, формы и точности заготовки и размерам, форме и точности готовой детали за счет использования прогрессивных методов заготовительного производства.

*Использование более дешевых материалов для изготовления изделия обеспечивается следующими мерами.*

1. Глубокий анализ функционального назначения изделия позволяет обоснованно применять более дешевые материалы без ухудшения качества изделия, например заменить стальные детали чугунными или пластмассовыми без ухудшения качества изделия.

2. Использование комбинированных заготовок, получаемых сваркой трением. Примером могут служить клапаны двигателей внутреннего сгорания, спиральные сверла, рабочая часть которых выполняется из дорогостоящих материалов (легированной, быстрорежущей сталей), а хвостовики делаются из более дешевого материала (углеродистая сталь).

*Получение отходов материалов в наиболее ценном виде.*

Наибольшую ценность имеют отходы, которые могут служить заготовками для других деталей. В этом случае  $q_i = Q_i$ .

Примером реализации этого направления может служить кольцевое сверление отверстий большого диаметра (рис. 7.4).

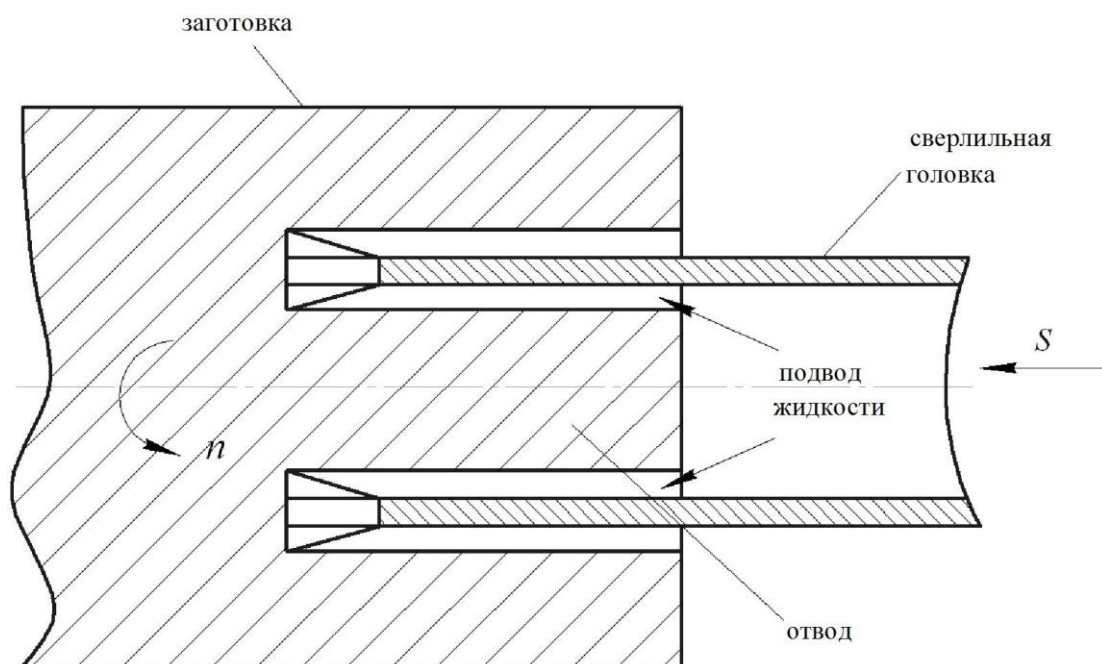


Рис. 7.4 Схема высверливания центральной части заготовки в виде стержня вместо превращения ее в стружку

Высверленный стержень в этом случае может служить заготовкой для изготовления валика или оси.



### 7.3.2 Сокращение расходов на заработную плату

Расходы на заработную плату определяются следующим образом:

$$З = \sum_{j=1}^J \left( \frac{SZ_{1j}}{f_{1j}} + \frac{SZ_{2j}}{f_{2j}} \right) \cdot \frac{t_{шт-к j}}{60},$$

где  $SZ_{1j}$  – тарифная ставка основного рабочего на  $j$ -й операции;  $f_{1j}$  – количество станков, обслуживаемых одним рабочим;  $SZ_{2j}$  – тарифная ставка наладчика на  $j$ -й операции;  $f_{2j}$  – количество станков, обслуживаемым одним наладчиком;  $t_{шт-к j}$  – норма штучно-калькуляционного времени на  $j$ -ю операцию.

В соответствии с этим выражением основными путями сокращения затрат на заработную плату являются:

#### 1. Сокращение норм времени на выполнение операций

$$t_{шт-к j} \rightarrow \min.$$

#### 2. Увеличение количества единиц оборудования, обслуживаемых основными рабочими и наладчиками

$$f_{1j} \rightarrow \max \text{ и } f_{2j} \rightarrow \max.$$

#### 3. Уменьшение количества операций, необходимых для изготовления изделия $J \rightarrow \min$ .

#### 4. Снижение квалификации работы путем ее упрощения

$$SZ_{1j} \rightarrow \min \text{ и } SZ_{2j} \rightarrow \min.$$

Первые три способа реализуются путем увеличения производительности труда.

### 7.3.3 Технологические основы увеличения производительности труда

Анализ формулы для определения нормы штучно-калькуляционного времени на операцию показывает три пути повышения производительности труда рабочего: сокращение подготовительно-заключительного времени  $T_{пз} \rightarrow \min$ ; увеличение количества изделий в партии  $n \rightarrow \max$ ; сокращение штучного времени  $t_{шт} \rightarrow \min$ .

*Пути сокращения подготовительно-заключительного времени.* Это время складывается из времени на получение и озна-

комление рабочего с заданием  $t_3$ ; времени на получение и установку на станке режущего инструмента  $t_{и}$ ; времени на установку приспособлений на станке  $t_{п}$ ; времени на статическую настройку технологической системы  $t_c$ :

$$T_{пз} = t_3 + t_{и} + t_{п} + t_c.$$

Время на получение и ознакомление рабочего с заданием  $t_3$  может быть уменьшено за счет улучшения качества конструкторской и технологической документации путем неукоснительного соблюдения стандартов ЕСКД, ЕСТД, ЕСТПП, использования систем автоматизированного проектирования.

Сокращение времени на получение и установку на станке режущего инструмента  $t_{и}$  осуществляется:

- использованием приспособлений для быстрой смены инструмента – быстросменных патронов, многопозиционных приспособлений для крепления режущего инструмента;
- использованием сменных блоков инструментов – блоков резцов, наборов фрез и т.п.;
- применением сменных револьверных головок с заранее установленным режущим инструментом на револьверных станках;
- использованием регулируемых конструкций режущих инструментов, позволяющих регулировать положение режущих кромок относительно базовой части инструмента без его снятия со станка.

Сокращение времени на установку приспособлений на станке  $t_{п}$  может быть обеспечено установкой приспособлений на столах станков методом полной взаимозаменяемости.

Сокращение времени на статическую настройку технологической системы  $t_c$  может быть достигнуто:

- применением для настройки станков специальных контрольных приспособлений, повышающих одновременно точность и производительность настройки – встроенных индикаторов, датчиков и т.п.;
- использованием станков с программным управлением, перенастройка которых производится сменой программы. При этом

за наладчиком остается настройка технологической системы на требуемую точность обработки;

– использованием систем автоматической переналадки станков на точность при смене объекта;

– настройкой станков методом полной взаимозаменяемости (с настройкой инструмента на получаемый размер вне станка).

*Пути увеличения количества  $n$  изделий в партии.*

Увеличение количества изделий может быть достигнуто двумя путями:

1. Увеличением количества деталей в партии, т.е. увеличением серийности производства, и, в идеале, доведением его до массового. В этом случае норма подготовительно-заключительного времени становится исчезающе малой. Проблема заключается в том, что количество выпускаемых машин диктуется рынком.

2. Использованием групповой обработки деталей.

Смысл групповой обработки деталей заключается в том, что размер партии  $n$  увеличивается за счет обработки различных деталей, близких по назначению, конструкции, размерам, материалу, технологии обработки и т.п.

Для реализации этого способа:

1. Собирается группа деталей, схожих по конструкции, габаритам и технологии изготовления. В группу может входить от 5 до 10...15 типоразмеров деталей.

2. Из этой группы выбирается деталь-представитель – деталь, имеющая наиболее сложные формы.

3. Для детали-представителя проектируется технологический процесс, называемый групповым. При этом размер партии составит

$$n = \sum_{i=1}^I n_i,$$

где  $i$  – номер типоразмера детали;  $n_i$  – размер партий каждого типоразмера детали.

4. Детали различных типоразмеров обрабатываются в соответствии с разработанным технологическим процессом. Переход от обработки одного типоразмера деталей к обработке другого возможен:

– без переналадки станков: станки настраиваются на обработку самой сложной детали, затем некоторые переходы, отсутствующие при обработке простых деталей, исключаются;

– с частичной переналадкой станков, которая производится на револьверных станках сменой позиции револьверной головки (групповые наладки), на других типах станков – использованием групповых приспособлений, т.е. сменой групповой наладки (сменной губок тисков, сменой кулачков патронов).

Главным условием эффективности групповой обработки деталей является быстрая перенастройка станков с одного типоразмера деталей на другой.

*Пути сокращения штучного времени  $t_{шт}$ .* Из анализа формулы штучного времени

$$t_{шт} = t_o + t_b + t_{обс} + t_{отд}$$

очевидно, что оно может быть сокращено двумя путями:

- сокращением величины слагаемых  $t_o$ ,  $t_b$ ,  $t_{обс}$ ,  $t_{отд}$ ;
- совмещением переходов и приемов технологической операции во времени, полным или частичным.

Штучное время может быть сокращено в основном за счет сокращения основного (машинного) и вспомогательного времени, составляющих наибольшую долю (92...95 %) среди других слагаемых.

Анализ формулы

$$t_o = t_m = \frac{(L + l_{вр} + l_{пер}) \cdot i}{n \cdot S_o}$$

показывает, что сокращение основного времени, если оно является машинным, может производиться следующими путями.

1. Сокращение пути относительного перемещения режущего инструмента и обрабатываемой детали  $(L + l_{вр} + l_{пер})$ :

- увеличением диаметров фрез при фрезеровании (рис. 7.5, а);
- установкой фрезы по линии симметрии деталей (рис. 7.5, б.);
- обработкой нескольких последовательно установленных деталей (многоместная обработка, рис. 7.5, в);
- обработкой каждой из поверхностей несколькими инструментами – многоинструментальная обработка (рис. 7.6). Так, при точении вала одним резцом (рис. 7.6, а) рабочий ход составит

$$L = L_1 + L_2 + l_1 + l_2,$$

тогда как при точении вала двумя резцами (рис. 7.6, б) рабочий ход сократится вдвое  $L = L_1 + l_1$ ,

поскольку  $l_2$  и  $L_2$  перекрываются;

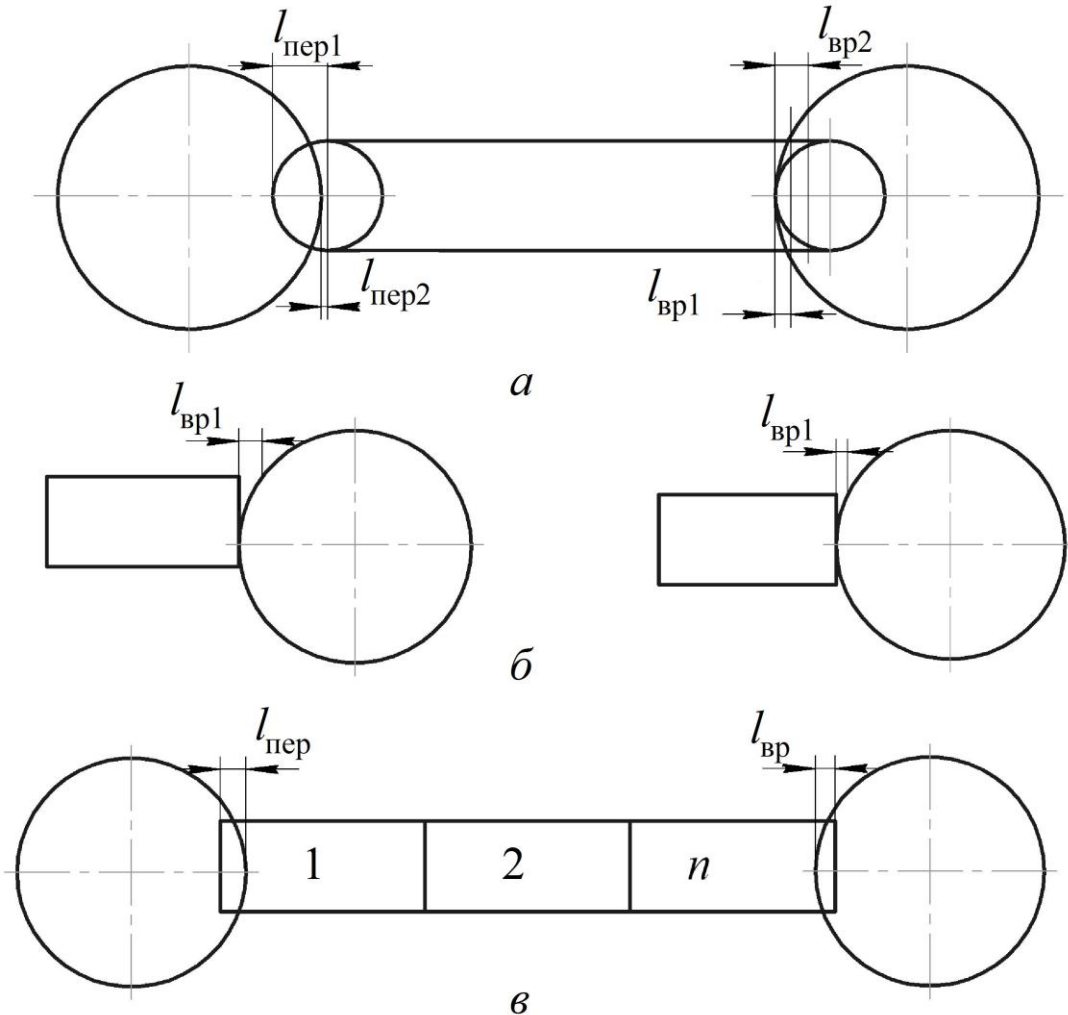


Рис. 7.5 Способы сокращения длины врезания и перебега режущего инструмента

При этом длина рабочего хода равна

$$L = t + l_{\text{вр}},$$

где  $t$  – припуск под обработку;  $l_{\text{вр}}$  – длина врезания инструмента.

Применение этого метода ограничивается мощностью привода станков.

2. Обработка деталей с оптимальными режимами.

Машинное время будет тем меньше, чем выше частота вращения шпинделя  $n$  станка (скорость резания) и подача  $S$  инстру-

мента. Однако скорость резания лимитируется стойкостью режущего инструмента, а подача инструмента ограничивается точностью обработки и шероховатостью поверхностей. Поэтому при обработке должны выбираться режимы резания, обеспечивающие заданную стойкость инструмента, точность обработки и шероховатость поверхностей.

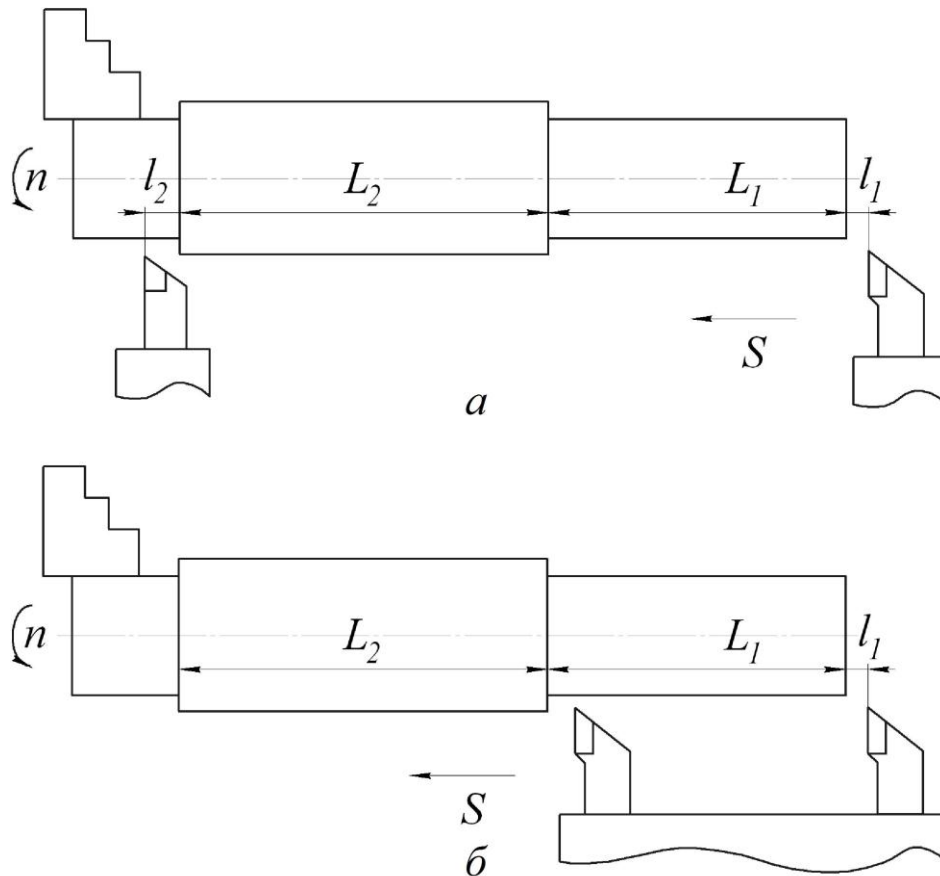


Рис. 7.6 Сокращение длины рабочего хода за счет многоинструментальной обработки

– обработкой коротких поверхностей широким инструментом (рис. 7.7).

3. Сокращение количества рабочих ходов  $i$  может быть произведено за счет:

- сокращения припусков под обработку путем использования заготовок, близких по форме и размерам к готовым деталям;
- увеличения мощности приводов станков;
- обработки на станках с системами адаптивного управления.

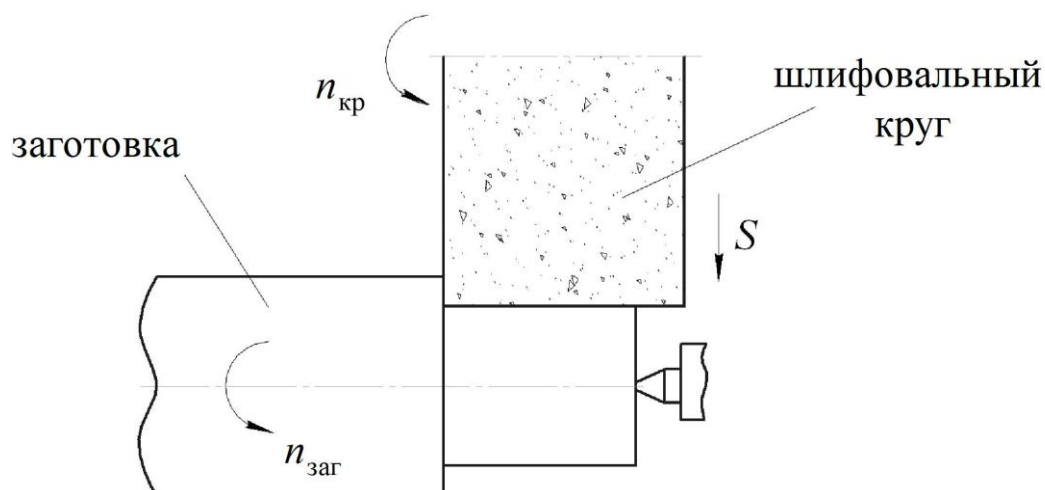


Рис. 7.7 Обработка поверхностей широким инструментом

Перечисленные пути позволяют значительно сократить основное (машинное) время таким образом, что основную долю штучного времени начинает составлять вспомогательное время. Может случиться так, что дальнейшее сокращение  $t_o$  окажется неэффективным из-за большой доли вспомогательного времени  $t_b$  в структуре штучного времени.

Сокращение вспомогательного времени  $t_b$  осуществляется двумя путями.

1. Непосредственное сокращение величины  $t_b$ , которое осуществляется следующими мерами:

- уменьшение времени, расходуемого на замену обработанной детали заготовкой путем: установки заготовки в приспособлении методом полной взаимозаменяемости, без выверки; сокращения времени закрепления и открепления деталей за счет применения стандартных средств крепления (зажимов, прихватов); механизации зажима; автоматизации замены детали;

- уменьшение времени на управление станком, приспособлениями, путем: концентрации управления технологической системой в одной зоне; механизации и автоматизации управления технологической системой; использования автоматов, полуавтоматов и станков с программным управлением;

- уменьшение времени на контроль за ходом технологического процесса путем правильного выбора методов и средств из-

мерения, механизации, автоматизации контроля, комплексной автоматизации технологического процесса.

2. Совмещение затрат времени вспомогательных приемов с основным временем.

В общем случае у любой детали необходимо обработать большое количество одинаковых или различных поверхностей, расположенных на одной или нескольких сторонах детали.

Обработку поверхностей можно выполнять последовательно, параллельно или параллельно-последовательно, группами.

При последовательной обработке основное время будет представлять сумму затрат времени на обработку каждой поверхности

$$t_o = t_{o_1} + t_{o_2} + \dots + t_{o_i} = \sum_{i=1}^I t_{o_i} .$$

При этом сокращение основного времени на всю операцию невозможно.

При параллельной обработке всех поверхностей детали основное время обработки всей детали будет равно времени, затрачиваемому на выполнение наиболее продолжительного перехода

$$t_o = t_{\text{онб}} .$$

Очевидно существенное сокращение основного времени на всю операцию.

При параллельно-последовательной обработке поверхности детали обрабатываются группами, причем внутри каждой группы ведется параллельная обработка поверхностей, группы обрабатываются последовательно одна за другой. При этом основное время на всю операцию определяется как сумма основных времен по каждой группе обрабатываемых поверхностей

$$t_o = t_{o_{1\text{гр}}} + t_{o_{2\text{гр}}} + \dots + t_{o_{i\text{гр}}} = \sum_{i=1}^I t_{o_{i\text{гр}}} .$$

При этом основное время обработки всей детали сокращается, но в меньшей степени, чем при параллельной обработке.

Наибольший эффект получается, если удастся полностью совместить вспомогательное время  $t_{\text{в}}$  и время обслуживания рабочего места  $t_{\text{обс}}$  с основным временем  $t_o$ .

В этом случае при полном совмещении времен



$$t_{шт} = t_o + t_{отд}.$$

Используются следующие способы совмещения  $t_b$  с  $t_o$ :

а) маятниковая обработка деталей на продольно-фрезерных станках (рис. 7.8).

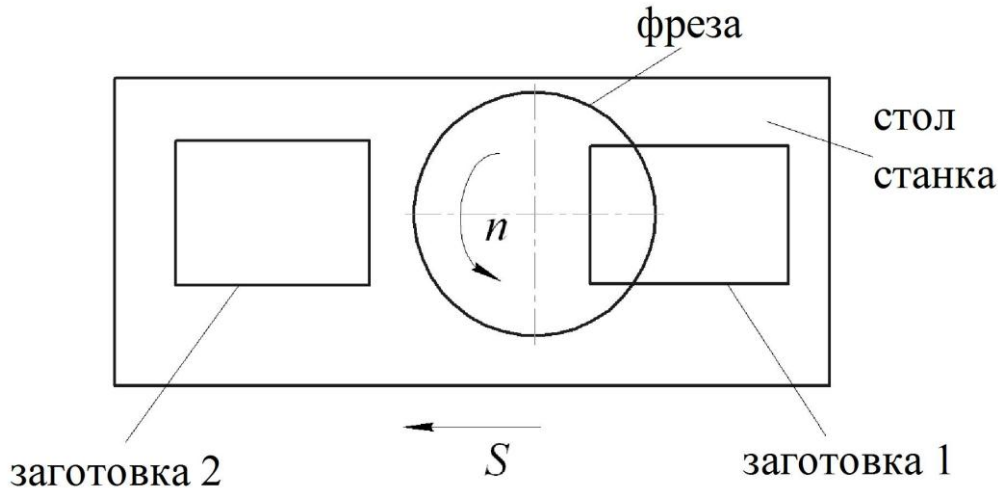


Рис. 7.8 Маятниковая обработка на продольно-фрезерном станке (вид сверху)

На столе вертикально-фрезерного станка установлены два приспособления для закрепления заготовок. Пока стол движется с подачей  $S$  относительно торцевой фрезы и происходит обработка первой заготовки, рабочий во втором приспособлении меняет обработанную деталь на заготовку. После обработки первой заготовки рабочий меняет направление подачи стола на противоположное, и, пока обрабатывается вторая заготовка, производится замена детали на заготовку на первой позиции;

б) многоинструментальная обработка на револьверных станках, позволяющих, пока работает блок инструментов в головке, сменить и подвести инструмент в резцедержателе, т.е. обеспечивается попеременная работа суппорта и головки станка;

в) измерение размера в процессе обработки детали с использованием систем активного контроля, переключающих режим работы станка по достижению заданного размера.

Наиболее эффективной формой совмещения переходов является совместная обработка деталей.

При совместной обработке детали могут устанавливаться последовательно (рис. 7.9, *а*), параллельно (рис. 7.9, *б*) и комбинированно (рис. 7.9, *в*).

При этом наибольшее сокращение  $t_{шт}$  дает одновременное использование совмещения переходов и совместной обработки деталей путем использования:

- многошпиндельных полуавтоматических и автоматических станков;
- агрегатных многошпиндельных и многопозиционных станков;
- автоматических линий;
- роторных линий.

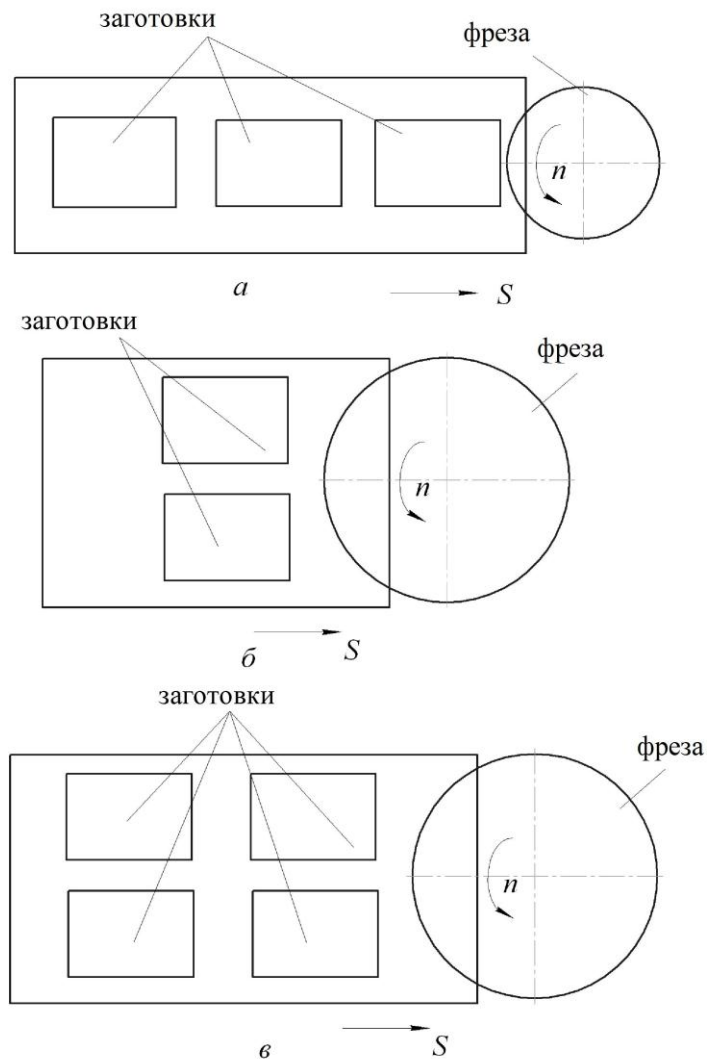


Рис. 7.9 Способы установки деталей на вертикально-фрезерном станке (вид сверху на стол)

### 7.3.4 Типизация технологических процессов

*Типизация* – это направление в проектировании технологических процессов, заключающееся в классификации изделий машиностроения и в комплексном решении всех задач, связанных с их производством на основе применения прогрессивных технологических процессов и последних достижений науки и техники.

Идея типизации родилась на рубеже 30-х – 40-х годов прошлого века с целью повышения эффективности инженерного труда при технологической подготовке производства бурно развивающегося машиностроения страны.

Типизация технологических процессов прошла два этапа:

1. Классификация изделий машиностроения. При этом под классом понималась группа деталей, объединенная общностью определенных задач, возникающих при их изготовлении.

Исторически существует несколько классификаций деталей.

*Классификация А. П. Соколовского*, основоположника типизации, осуществлялась по конструкторскому признаку. Здесь различались классы валов, рычагов, угольников, втулок, плит, дисков, зубчатых колес, стоек и т.д. Недостатком классификации явилось большое количество классов деталей и отсутствие связи классификации с технологией изготовления.

*Классификация Ф. С. Демьянюка* основана на технологическом признаке. Предложены следующие классы деталей:

- корпусные детали;
- круглые стержни;
- полые цилиндры;
- диски;
- некруглые стержни (рычаги);
- крепежные детали.

При небольшом количестве классов недостаток этой классификации заключался в отсутствии связи со служебным назначением детали. Например, в класс дисков могли попасть и фланец и зубчатое колесо, имеющие различное служебное назначение

*Классификация Б. С. Балакшина* выполняется по служебному назначению деталей. Детали машин классифицировались по их служебному назначению, объединяющему как их конструктивные, так и технологические признаки.

*Общесоюзный классификатор деталей машиностроения*, разработанный в 1982 году, предполагает два класса деталей: детали типа тела вращения (класс 50) и детали не тела вращения (класс 40). Здесь каждый класс делится на подклассы, группы и подгруппы, в каждой подгруппе выделяют типовую деталь, т.е. деталь, включающую все признаки деталей группы.

Классификация проводится одновременно с унификацией и нормализацией деталей машин.

2. Разработка типового технологического процесса производства каждого класса изделий, включающего в себя:

- типовую последовательность и содержание технологических операций;
- типовые схемы базирования заготовок;
- типовые конструкции технологической оснастки и режущего инструмента;
- типовые компоновки металлорежущего оборудования.

Если перед типизацией проведена полная унификация деталей, то для них составляется единый технологический процесс с нормами времени.

Если степень унификации низка, разрабатывается принципиальный технологический процесс, на базе которого составляются технологические процессы для определенных деталей.

Достоинства типизации:

- сокращение сроков технологической подготовки производства, обеспечиваемое ускорением проектирования технологических процессов;
- удешевление технологической подготовки производства;
- более широкое применение средств механизации и автоматизации технологических процессов;
- использование типовой переналаживаемой оснастки и стандартного режущего инструмента;
- создание типовых компоновок универсального и специализированного оборудования, направленных на реализацию типовых технологических процессов;
- возможность организации специализированных цехов и заводов по изготовлению однотипных изделий на основе унификации элементов технологических процессов.

### 7.3.5 Технологичность конструкций машин

*Технологичность* это свойство конструкции изделия, позволяющее в полной мере использовать все возможности и особенности технологического процесса, обеспечивающего его качество при заданной производительности изготовления.

Для оценки технологичности используется ряд основных и дополнительных показателей.

К основным показателям относятся трудоемкость, себестоимость и материалоемкость изделия.

К дополнительным показателям могут быть отнесены степень унификации марок материалов, степень унификации и нормализации элементов изделия, степень взаимозаменяемости элементов изделия, масса машины, средний класс точности и шероховатости и т.п.

Отработка конструкции изделия на технологичность заключается в разработке предложений по изменению конструкции изделия, улучшающих его показатели технологичности.

Отработка конструкции изделия на технологичность проходит два этапа:

- анализ технологичности конструкции изделия;
- разработка предложений по улучшению технологичности изделия.

Анализ технологичности конструкции изделия проводится на двух уровнях.

Качественный анализ технологичности – это субъективная оценка технологичности конструкции, проведенная методом экспертного опроса. На этом этапе выделяется ряд субъективных признаков технологичности конструкции изделия и определяется их наличие или отсутствие.

Количественный анализ технологичности заключается в расчете основных показателей технологичности и сравнении их с базовыми показателями.

Технологичность, как понятие, обладает двумя аспектами.

1. Технологичность – понятие относительное. Это обусловлено тем, что основные показатели технологичности изделия определяются для того, чтобы сравнить их с базовыми показателями. Кроме того, технологичность зависит от типа производства.

Изделие, технологичное для массового производства, как правило, нетехнологично в единичном производстве, и наоборот. Это обусловлено различием типов применяемого оборудования и формой организации производства.

2. Технологичность – понятие комплексное, поскольку оценивается на всех стадиях жизненного цикла изделия, начиная проектированием изделия и кончая его утилизацией.

### 7.3.6 Обслуживание одним рабочим нескольких единиц оборудования

С повышением степени механизации и автоматизации оборудования у рабочего появляется все больше свободного времени, особенно когда станок работает по автоматическому или полуавтоматическому циклу. В течение этого времени рабочий может обслуживать другое оборудование.

Количество одинаковых станков, которые может обслуживать один рабочий при полном использовании его времени (если операции однотипны):

$$f \leq \frac{t_{\text{шт}}}{T_p + T_x},$$

где  $t_{\text{шт}}$  – штучное время обработки детали на одном станке;  $T_p$  – время работы рабочего на одном станке;  $T_x$  – время перехода рабочего от одного станка к другому.

Чаще всего  $f$  получается как дробное число. При этом если принять  $f_o > f$ , будут простаивать станки; если принять  $f_o < f$ , будет простаивать рабочий.

Наибольшая производительность достигается, когда  $t_{\text{шт}}$  кратно сумме  $T_p + T_x$ .

Эта кратность достигается соответствующей разработкой технологического процесса с учетом этого соотношения и расстановкой оборудования и организацией рабочих мест так, чтобы сократить время переходов  $T_x$ .

В современном производстве используется высокопроизводительное оборудование и очень редко на одну операцию ставится более одного станка. Следовательно, рабочему приходится обслуживать либо одинаковые станки, выполняющие различные

операции, либо различные станки, выполняющие различные операции.

В этой связи, возникает необходимость в совмещении профессий, т.е. в приобретении рабочим квалификаций, необходимых для обслуживания различных типов оборудования.

Если все-таки  $t_{шт}$  не кратно сумме  $T_p + T_x$ , стремятся как можно полнее использовать время рабочего, т.е. выполнить условие  $f_o > f$ . Однако, если в работе участвуют уникальные станки или очень дорогие станки, то полнее должно использоваться время станка, т.е.  $f_o < f$ .

## ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

### Раздел 1. Основные понятия и определения.

1. Определение и предмет науки «технология машиностроения».
2. Что такое технологическая подготовка производства?
3. Понятие технологической готовности производства.
4. Что относится к средствам технологического оснащения?
5. Что такое производственный процесс?
6. Что такое технологический процесс?
7. Что такое рабочее место?
8. Определение технологической операции
9. Что такое технологический переход?
10. Что такое рабочий ход?
11. Определение нормы времени.
12. Программа выпуска продукции.
13. Производственная партия.
14. Такт выпуска.

### Раздел 2. Типы и организационные формы производства.

1. Тип производства.
2. Коэффициент закрепления операций.
3. Основные признаки массового производства.
4. Основные признаки серийного производства.
5. Основные признаки единичного производства.
6. Основные признаки поточной формы производства.
7. Основные признаки непоточной формы производства.
8. Область применения поточной и непоточной форм производства.

### Раздел 3. Машина как объект производства.

1. Служебное назначение машин.
2. Исполнительные поверхности машины и связи между ними.
3. Виды поверхностей деталей машин.
4. Понятие качества продукции.
5. Определение точности деталей и машин.
6. Нормированная и фактическая точность.
7. Номинальный, фактический и измеренный размеры.



8. Точность размеров.
9. Точность относительных поворотов поверхностей.
10. Точность формы поверхностей.
11. Себестоимость изготовления машины.

#### Раздел 4. Основы достижения качества машины.

1. Размерная цепь. Виды звеньев размерных цепей – замыкающее, составляющее увеличивающее и уменьшающее, компенсирующее, общее звено
  2. Виды размерных цепей по назначению, по характеру звеньев, по расположению звеньев.
  3. Уравнение размерной цепи.
  4. Рассеивание размеров в партии деталей.
  5. Построение точечной диаграммы.
  6. Поле рассеивания размеров в партии деталей – погрешность обработки в партии.
  7. Построение практической кривой рассеивания размеров.
  8. Характеристики практической кривой рассеивания размеров.
  9. Законы распределения погрешностей размеров в машиностроении.
  10. Влияние доминирующих факторов на искажение кривых рассеивания размеров.
  11. Погрешность замыкающего звена размерной цепи.
  12. Метод полной взаимозаменяемости при достижении точности замыкающего звена размерной цепи. Условия реализации, область применения метода.
  13. Метод неполной взаимозаменяемости при достижении точности замыкающего звена размерной цепи. Условия реализации, область применения метода.
  14. Метод групповой взаимозаменяемости при достижении точности замыкающего звена размерной цепи. Условия реализации, область применения метода.
  15. Метод пригонки при достижении точности замыкающего звена размерной цепи. Условия реализации, область применения метода.

16. Метод регулирования при достижении точности замыкающего звена размерной цепи. Условия реализации, область применения метода.

17. Основные определения теории базирования – базирование, база, комплект баз, опорная точка.

18. Контактные пластические деформации деталей.

19. Правило шести точек.

20. Классификация баз по назначению, по лишаемым степеням свободы, по характеру проявления.

21. Определенность и неопределенность базирования.

22. Смена баз.

23. Принцип совмещения и единства баз.

24. Методы получения и измерения размеров, расстояний и относительных поворотов поверхностей.

25. Погрешность измерения. Производственный допуск.

#### Раздел 5. Основы достижения качества деталей машин

1. Уточнение расчетное и фактическое.

2. Понятие технологической системы «станок–приспособление–инструмент–деталь».

3. Методы достижения точности размеров, относительных поворотов поверхностей и формы поверхностей.

4. Установка заготовки в технологической системе. Размер установки и погрешность установки.

5. Статическая настройка технологической системы. Размер статической настройки и погрешность статической настройки технологической системы.

6. Динамическая настройка технологической системы. Размер динамической настройки и погрешность динамической настройки технологической системы.

7. Правила выбора технологических баз деталей I–й и II–й группы.

8. Влияние геометрических размеров базовых поверхностей на точность установки.

9. Задачи, решаемые при выборе технологических баз для первой операции механической обработки детали.

10. Правила выбора измерительных баз.

11. Сокращение погрешностей установки заготовки за счет дополнительных факторов.

12. Пути сокращения погрешности статической настройки технологической системы.

13. Схемы базирования приспособлений на станках.

14. Схемы установки режущего инструмента на станках.

15. Настройка и поднастройка технологической системы.

16. Настройка технологической системы на обработку одной детали методом пробных проходов и промеров.

17. Настройка технологической системы на обработку партии деталей.

18. Пути сокращения погрешности динамической настройки технологической системы.

19. Влияние колебаний толщины снимаемого слоя материала и твердости обрабатываемой поверхности на точность обработки.

20. Понятие жесткости технологической системы.

21. Статическая жесткость технологической системы. Диаграмма жесткости.

22. Динамическая жесткость технологической системы. Методы определения динамической жесткости.

23. Вибрации технологической системы и их влияние на точность обработки. Способы борьбы с вибрациями.

24. Сокращение влияния размерного износа режущего инструмента на точность обработки.

25. Тепловые деформации технологической системы. Сокращение влияния тепловых деформаций на точность обработки.

26. Деформации деталей из-за перераспределения остаточных напряжений.

Раздел 6. Управление качеством поверхностного слоя деталей машин

1. Понятие о поверхностном слое детали.

2. Структура поверхностного слоя.

3. Понятие о качестве поверхностного слоя детали.

4. Классификация основных параметров качества поверхностного слоя деталей машин.

5. Что такое шероховатость поверхности?

6. Классификация параметров шероховатости поверхности.
7. Параметры шероховатости, используемые в научных исследованиях.
8. Основные принципы обозначения шероховатости поверхности.
9. Нормирование шероховатости поверхности.
10. Методы и средства оценки шероховатости поверхности.
11. Бесконтактные методы контроля шероховатости.
12. Контактные методы контроля шероховатости.
13. Волнистость поверхности.
14. Регулярные микрорельефы.
15. Упрочнение (наклеп) поверхностного слоя.
16. Параметры упрочнения.
17. Методы определения параметров упрочнения.
18. Остаточные напряжения.
19. Параметры остаточных напряжений.
20. Методы определения остаточных напряжений.
21. Влияние технологических факторов на формирование качества поверхностного слоя деталей машин.
22. Влияние технологических факторов на шероховатость поверхности.
23. Влияние технологических факторов на упрочнение и остаточные напряжения.
24. Влияние качества поверхностного слоя на эксплуатационные свойства деталей машин.
25. Технологические методы повышения качества поверхностного слоя и эксплуатационных свойств деталей машин.
26. Технологическая наследственность в машиностроении.

## Раздел 7. Основы снижения себестоимости машин

1. Понятие технического нормирования. Методы нормирования.
2. Структура нормы штучно-калькуляционного времени.
3. Методы разработки нормативов вспомогательного и подготовительно-заключительного времени.
4. Критерии экономической эффективности технологических процессов.

5. Методы выбора экономичного варианта технологического процесса.

6. Влияние количества выпускаемых машин на их себестоимость.

7. Пути сокращения расходов на материалы при изготовлении машин.

8. Пути сокращения затрат на заработную плату основных рабочих при изготовлении машин.

9. Пути сокращения составляющих элементов штучно-калькуляционного времени.

10. Повышение производительности путем совмещения составляющих элементов штучно-калькуляционного времени.

11. Типизация технологических процессов как способ повышения производительности труда технолога.

12. Технологичность конструкций изделий машиностроения.

13. Повышение производительности путем многостаночного обслуживания.

## СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Колесов, И. М. Основы технологии машиностроения / И. М. Колесов. – М.: Машиностроение, 2000. – 591 с.
2. ГОСТ 21495–76. Базирование и базы в машиностроении. – Введ. 01.01.1977. – М.: Изд-во стандартов, 1976. – 37 с.
3. Сулима, А. И. Поверхностный слой и эксплуатационные свойства деталей маши / А. И. Сулима, В. А. Шулов, Ю. Д. Ягодкин. – М.: Машиностроение, 1988. – 240 с.
4. Технология машиностроения: в 2 т. Т. 1. Основы технологии машиностроения: учебник для вузов / В. М. Бурцев, А. С. Васильев, А. М. Дальский [и др.]; под ред. А. М. Дальского. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 1999. – 564 с.: ил.
5. Фурке, Дж. Обработка поверхности и надежность материалов: [пер. с англ.] / Дж. Фурке, Ф. Вайса. – М.: Мир, 1985. – 192 с.: ил.
6. ГОСТ 2789–73. Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики. – Введ. 01.01.1975. – М.: Изд-во стандартов, 1973. – 7 с.
7. ГОСТ 25142–82. Шероховатость поверхности. Термины и определения. – Введ. 01.01.1983. – М.: Изд-во стандартов, 1982. – 22 с.
8. Овсеенко, А. Н. Формирование состояния поверхностного слоя деталей машин технологическими методами / А. Н. Овсеенко, М. М. Гашек, В. И. Серебряков. – Ополе: Политехника Опольска, 2001. – 228 с.
9. ГОСТ 2.309–73. ЕСКД. Обозначения шероховатости поверхностей. – Введ. 01.01.1975. – М.: Изд-во стандартов, 1973. – 9 с.
10. Шнейдер, Ю. Г. Эксплуатационные свойства деталей с регулярным микрорельефом / Ю. Г. Шнейдер. – Л.: Машиностроение, 1982. – 248 с.
11. Папшев, Д. Д. Отделочно-упрочняющая обработка поверхностным деформированием / Д. Д. Папшев. – М.: Машиностроение, 1978. – 152 с.
12. Харитонов, Л. Г. Определение микротвердости. Методика испытаний. Измерение отпечатков. Номограммы и таблицы для определения микротвердости / Л. Г. Харитонов. – М.: Металлургия, 1967. – 46 с.

13. Смелянский, В. М. Механика упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием / В. М. Смелянский. – М. : Машиностроение, 2002. – 300 с.

14. Технологические остаточные напряжения / под ред. А. В. Подзея. – М. : Машиностроение, 1973. – 216 с.

15. Меркулова, Н. С. Совершенствование средств контроля поверхностных остаточных напряжений и их метрологическая аттестация / Н. С. Меркулова, Т. О. Иванова, М. И. Гринченко // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2006. – №3. – С. 35–40.

16. Маталин, А. А. Технология механической обработки / А. А. Маталин. – Л. : Машиностроение, 1977. – 464 с.

17. Повышение выносливости и надежности деталей машин и механизмов / Б. А. Кравченко [и др.]. – Куйбышев: Куйбышевское книжное изд-во, 1966. – 222 с.

18. Кудрявцев, И. В. Внутренние напряжения как резерв прочности в машиностроении / И. В. Кудрявцев. – М. : Машгиз, 1951. – 280 с.

19. Суслов, А. Г. Научные основы технологии машиностроения / А. Г. Суслов, А. М. Дальский. – М. : Машиностроение, 2002. – 684 с.

20. Дальский, А. М. Технологическое обеспечение надежности высокоточных деталей машин / А. М. Дальский. – М. : Машиностроение, 1975. – 223 с.

21. Ящерицын, П. И. Технологическая наследственность в машиностроении / П. И. Ящерицын, Э. В. Рыжов, В. И. Аверченков. – Минск: Наука и техника, 1977. – 256 с.

22. Дальский, А. М. Технологическая наследственность в машиностроительном производстве / А. М. Дальский [и др.]; под ред. А. М. Дальского. – М. : Изд-во МАИ, 2000. – 364 с.

24. Блюменштейн, В. Ю. Механика технологического наследования на стадиях обработки и эксплуатации деталей машин / В. Ю. Блюменштейн, В. М. Смелянский. – М. : Машиностроение-1, 2007. – 400 с.

**Валерий Юрьевич Блюменштейн  
Александр Алексеевич Клепцов**

## **ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИИ МАШИНОСТРОЕНИЯ**

**Учебное пособие**

Печатается в авторской редакции

Подписано в печать 27.03.2017. Формат 60×84/16  
Бумага офсетная. Гарнитура «Times New Roman». Уч.-изд. л. 17,0  
Тираж 100 экз. Заказ.....  
КузГТУ, 650000, Кемерово, ул. Весенняя, 28  
Издательский центр УИП КузГТУ, 650000, Кемерово, ул. Д. Бедного, 4а