

**А. М. Будюкин, А. А. Мигров, В. Г. Кондратенко**

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ  
ИЗГОТОВЛЕНИЯ УЗЛОВ И ДЕТАЛЕЙ  
ТРАНСПОРТНЫХ МАШИН**

Учебник

Москва Вологда  
«Инфра-Инженерия»  
2024

УДК 621.01  
ББК 34.41  
Б90

Рецензенты:

д. т. н., профессор ФГБОУ ВО ПГУПС  
*В. В. Грачев;*  
к. т. н., доцент, директор по ИТ ООО «ЮНИКОСМЕТИК»  
*Л. Б. Немцов*

**Будюкин, А. М.**

**Б90** Технологические процессы изготовления узлов и деталей транспортных машин : учебник / А. М. Будюкин, А. А. Мигров, В. Г. Кондратенко. – Москва ; Вологда : Инфра-Инженерия, 2024. – 356 с. : ил., табл.  
ISBN 978-5-9729-2074-7

Подробно рассмотрены основы технологии машиностроения. Освещены вопросы технологии изготовления типовых узлов и деталей транспортных машин. Даны основополагающие понятия теории дисциплины «Технология машиностроения», связанные с точностью механически обрабатываемой детали.

Предназначен в качестве основного источника литературы для изучения дисциплин «Технология машиностроения», «Технология конструкционных материалов», «Материаловедение и технология конструкционных материалов», «Материаловедение. Технология конструкционных материалов» для обучающихся направлений 23.04.02 «Ремонт и эксплуатация наземных транспортно-технологических комплексов и систем», 23.03.03 «Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов», а также специальностей 23.05.01 «Подъемно-транспортные, строительные, дорожные средства и оборудование», 23.05.03 «Подвижной состав железных дорог». Может быть использовано для подготовки студентов аналогичных специальностей и других вузов железнодорожного транспорта.

УДК 621.01  
ББК 34.41

ISBN 978-5-9729-2074-7

© Будюкин А. М., Мигров А. А., Кондратенко В. Г., 2024  
© Издательство «Инфра-Инженерия», 2024  
© Оформление. Издательство «Инфра-Инженерия», 2024

## ВВЕДЕНИЕ

Основой научно-технического прогресса является машиностроение, производящее орудия труда. От того, какие производятся машины, зависят производительные силы общества и уровень производительности труда.

Машиностроение – ключевая отрасль общественного производства. Одной из основных задач современного машиностроения является обеспечение конкурентоспособности выпускаемых изделий, которая определяется качеством и стоимостью. Одним из условий изготовления высококачественных изделий является применяемая технология. Разработка и использование прогрессивных технологических процессов во многом зависит от профессионализма их создателей. Поэтому изучение основ технологии машиностроения является составным звеном подготовки образованных специалистов.

Технология машиностроения – это наука, которая рассматривает закономерности процессов изготовления деталей машин. Она изучает общие теоретические вопросы производства машин. В технологии машиностроения рассматриваются понятия изделия, производственного и технического процессов, изучаются вопросы точности обработки и качества поверхности и поверхностного слоя деталей, излагаются основы проектирования технологических процессов и приводится технология типовых деталей и сборки машин.

Безотказность и долговечность деталей транспортных машин во многом закладывается на стадии их изготовления и существенно зависит от свойств материала детали, технологического процесса изготовления, а также от соблюдения технологической дисциплины на предприятии-изготовителе.

Предлагаемый учебник состоит из двух частей. В первой части излагаются основы технологии машиностроения, а во второй части – технологии изготовления и сборки типовых узлов транспортных машин и механизмов.

Основы технологии машиностроения подробно рассмотрены в первой части настоящего учебника. Разработка технологического процесса изготовления любой детали начинается с изучения назначения и конструктивных особенностей детали. Затем анализируются условия работы детали, ее отдельных поверхностей и конструктивных элементов. Определяются технические требования к детали, а также требования к технологичности ее изготовления. На основе оптимального варианта разрабатывается вся необходимая технологическая документация, предусмотренная государственными стандартами ЕСТПП. Основными элементами механических передач транспортных машин являются: валы, оси, зубчатые колеса, рычаги, вилки, а также различные корпусные детали. Поэтому, вторая часть посвящена рассмотрению вопросов, касающихся технологии изготовления этих типовых деталей машин: технологическим способам и методам, применяемым материалам, требованиям к изготовлению, используемому технологическому оборудованию и инструментам.

Технология машиностроения, как прикладная наука, сформировалась сравнительно недавно. В своем постепенном становлении она опиралась на практические знания, связанные с производством машин, на изобретения и технические решения, используемые на заводах и фабриках.

Так, уже в XVIII в. наблюдался заметный прогресс в развитии технологии производства орудий, станков и инструмента. Особенно выделялись своими технологическими новинками мастера Тульского оружейного завода, такие как Я. Батищев, М. Сидоров, И. Осипов.

Появление научного подхода к технологии обработки деталей следует отнести к первому десятилетию XIX в., когда академик В.И. Севергин сформулировал основные положения о технологии производственных процессов (1804), а затем в трудах профессоров И.А. Двигубского (1807), И.А. Тиме (1883) и А.П. Гавриленко (1908) были изложены основные научные положения и принципы формирования технологических процессов.

Импульс к развитию технологии машиностроения был дан в период индустриализации страны. Прогресс в промышленности сопровождался разработкой теоретических основ технологии машиностроения на базе экспериментальных исследований. Благодаря этому технология машиностроения сформировалась как научная дисциплина, развитию которой способствовали труды профессоров Н.А. Бородачева, А.Б. Яхина, А.И. Каширина, М.Е. Егорова, А.А. Маталина, С.П. Митрофанова, В.С. Корсакова и других ученых, а также коллективов научно-исследовательских и проектно-технологических институтов и передовых машиностроительных заводов.

Технология машиностроения прошла путь от простой систематизации производственного опыта механической обработки деталей и сборки машин до создания научно обоснованных положений, разработанных с использованием аппарата фундаментальных наук: математики, металлофизики, электроники и др.

Дальнейшее развитие технологии машиностроения связано с автоматизацией производственных процессов, созданием обрабатывающих систем с электронным управлением.

В развитии современного машиностроения можно выделить четыре этапа:

- создание и освоение станков и машин с ЧПУ. При использовании таких станков доля участия людей в производстве продукции снижается в два раза;
- появление многостаночных комплексов под общим управлением ЭВМ. В этом случае участие людей в производстве продукции сокращается в три раза;
- применение гибких автоматизированных производств (ГАП). Использование ГАП снижает долю участия человека в создании продукции примерно в шесть раз;
- создание и применение заводов-автоматов на базе ГАП. Такие заводы обеспечивают производство машин практически без участия человека.

Важнейшим современным направлением технологии машиностроения является создание методов обработки, позволяющих обеспечивать необходимые

эксплуатационные свойства деталей машин, повышающих их надежность и долговечность.

Технология машиностроения органично связана с такими дисциплинами, как теория резания, металлорежущие станки и инструменты, взаимозаменяемость и технические измерения, материаловедение. Рассмотрение технологических вопросов без их использования практически невозможно.

Технология машиностроения лежит в основе создания эффективных технологических процессов и творческого подхода к организации производства.

В основу учебника положены результаты научной и учебной работы по направлению «Технология машиностроения» и «Технология конструкционных материалов» сотрудников кафедры «Технология металлов» ПГУПС профессоров С.В. Алехина, И.А. Иванова, А.Ф. Богданова, а также авторов этого учебника.

# ЧАСТЬ I

## ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИИ МАШИНОСТРОЕНИЯ

---

### Глава 1

#### ВВЕДЕНИЕ В КУРС ТЕХНОЛОГИИ МАШИНОСТРОЕНИЯ

##### 1.1. Технология производства изделий: основные требования и технические средства

Производство изделий в машиностроении осуществляется с целью удовлетворения потребностей и заказов других отраслей промышленности и транспорта. При этом выпускаемые машины должны удовлетворять заданным требованиям, соответствующим качеству. Под качеством продукции понимают совокупность свойств, обуславливающих ее пригодность удовлетворять определенным потребностям в соответствии с ее назначением. Качество характеризуют комплексом показателей, к основным из которых относят технический уровень, определяющий степень совершенства машины, технологичность конструкций, характеризующая удобством изготовления, обслуживания и ремонта, а также эксплуатационные показатели, важнейшим из которых является надежность.

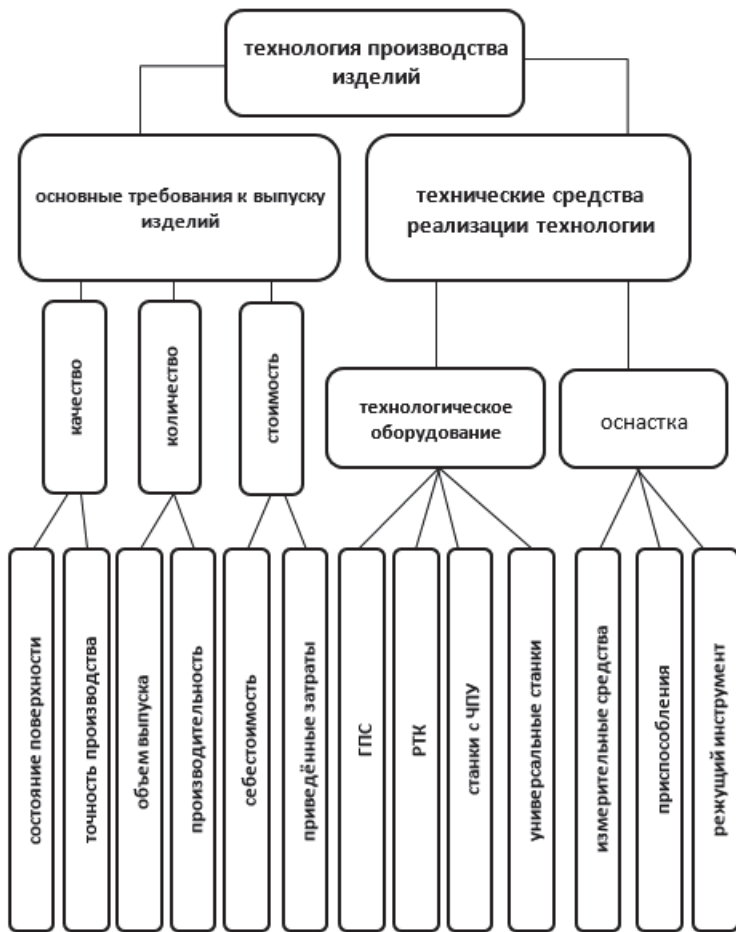
Надежность – это свойство машины выполнять свои функции, сохраняя эксплуатационные показатели в заданных пределах в течение требуемой наработки. Надежность – комплексное свойство, которое характеризуется безотказностью, долговечностью, ремонтпригодностью и сохраняемостью своих показателей.

В связи с этим технологические процессы должны обеспечивать выпуск изделий, удовлетворяющих заданным требованиям. К таким требованиям относятся, прежде всего, требования к качеству, количеству и стоимости выпускаемой продукции.

Как известно, технология может быть реализована различными техническими средствами. Перед специалистом-технологом в процессе разработки технологии стоит непростая задача: выбрать такие технические средства для выполнения технологического процесса, которые бы обеспечивали выпуск продукции, удовлетворяющей изложенной триаде требований. На схеме (рис. 1.1) показана взаимосвязь технических средств реализации технологии с выходными требованиями выпускаемой продукции.

Качество обрабатываемых изделий должно удовлетворять требованиям заданной точности размеров, формы и расположения поверхностей, а также заданному состоянию поверхности и поверхностного слоя – шероховатости поверхности, структуры, твердости и остаточных напряжений поверхностного слоя.

При этом выпуск продукции должен осуществляться с заданной производственной программой и производительностью при минимальных затратах.



**Рис. 1.1.** Структурная схема взаимосвязи основных требований к выпуску изделий и технических средств реализации технологии

Современные технические средства реализации технологии имеют широкий диапазон применения. В зависимости от типа производства в технологическом процессе могут быть использованы универсальные станки общего назначения, станки с ЧПУ, робототехнические комплексы (РТК), гибкие производственные системы (ГПС), а также различные приспособления и режущий инструмент.

Знание основ технологии машиностроения и творческий подход дают возможность современному инженеру принимать обоснованные решения по выбору технологических процессов для различных производственных условий.

## **1.2. Виды изделий**

Изделие – это предмет производства, подлежащий изготовлению как конечный продукт основного производства предприятия.

Изделия в зависимости от назначения разделяют на изделия основного и вспомогательного производства. К первым относят изделия, предназначенные для поставки (продажи), а ко вторым – изделия, предназначенные для собственных нужд предприятия.

В зависимости от конечной стадии данного производства изделиями могут быть не только машины, но и элементы машин в сборе, и отдельные детали. Например, для станкостроительного завода изделием является станок, для моторостроительного завода – двигатель, а для завода поршней – поршень. Виды изделий: деталь, сборочная единица, комплекс, комплект.

Деталь – изделие, изготовленное из однородного материала без применения сборочных операций.

Сборочная единица – изделие, составные части которого подлежат соединению между собой на предприятии изготовителе путем сборочных операций (свинчиванием, сваркой и др.).

Комплекс – это две или более сборочных единицы, несоединенные на предприятии изготовителе, но связанные между собой общими эксплуатационными функциями. Например, поточная линия, буровая установка и др.

Комплект – набор изделий, имеющих общее эксплуатационное назначение вспомогательного характера. Например, комплект запчастей, комплект инструмента и т. д.

## **1.3. Производственный процесс и типы производства**

Производственный процесс – это совокупность взаимосвязанных действий людей и орудий труда, необходимых на данном предприятии для изготовления или ремонта продукции.

К таким действиям относят:

- конструкторскую и технологическую подготовку производства;
- изготовление продукции;
- изготовление приспособлений и инструмента (технологической оснастки);
- обеспечение энергией;
- транспортирование и хранение продукции;
- контроль качества продукции;
- управление производством.



Под типом производства понимают организационно-технологическое состояние производственного процесса.

Тип производства характеризуют:

- широтой номенклатуры,
- регулярностью,
- стабильностью и объемом выпуска.

Различают три типа производства – массовое, серийное и единичное.

Массовое производство характеризуется узкой номенклатурой и большим объемом выпуска изделий, непрерывно изготавливаемых в течение продолжительного времени.

К особенностям массового производства относят применение поточных и автоматических линий, транспортно-конвейерных средств, высокопроизводительного оборудования, специальных приспособлений.

Выпуск продукции подчиняется такту (время между выпуском двух смежных изделий). Такт  $\tau$  определяется по формуле:

$$\tau = \frac{60 \cdot \Phi_D}{N}, \quad (1.1)$$

где  $\Phi_D$  – действительный фонд времени в планируемом периоде, ч,  
 $N$  – программа выпуска, шт.

Действительный фонд определяют:

$$\Phi_D = \Phi_N \cdot \eta,$$

где  $\Phi_N$  – номинальный годовой фонд времени (при двухсменной работе – 4140 ч),  
 $\eta$  – коэффициент, учитывающий простой оборудования в ремонте ( $\eta = 0,98 \div 0,96$ ).

При массовом производстве не требуются высококвалифицированные рабочие, но требуются грамотные специалисты-наладчики.

Используется следующая форма поточного производства:

1. Непрерывно-поточная.

В этом случае работают движущийся конвейер, операции по времени равны или кратны такту.

Пример – сборка автомобилей;

2. Прерывно-поточная (прямоточная).

Предмет труда в этом случае перемещается прерывисто (дискретно), нет «жесткой» синхронизации операций по времени цикла, возможны межоперационные простои в магазинах-накопителях.

Пример – автоматические линии без жестких связей, ГПС.

**Серийное** производство характеризуется ограниченной номенклатурой изделий, изготавливаемых повторяющимися партиями (сериями) при заданном объеме выпуска.

Партия – это группа заготовок одного наименования и типоразмера, запускаемых одновременно в производство.

К особенностям серийного производства относят необходимость переналадки станков с операции на операцию при изменении номенклатуры, широкое использование станков с ЧПУ, универсальных станков и приспособлений, наличие межоперационного складирования заготовок, более длительный цикл изготовления продукции, чем при массовом производстве.

Серийное производство является основным наиболее распространенным типом современного производства машиностроения и предприятиями этого типа выпускается в настоящее время 75–80 % всей продукции.

Серийное производство разделяют на: мелкосерийное, среднесерийное и крупносерийное.

**Единичное** производство характеризуется широкой номенклатурой и малым объемом выпуска.

К особенностям этого производства относят применение в основном универсального типового оборудования, размещаемого на участках по видам обработки (токарные, фрезерные, сверлильные и т. д.), наиболее длительный цикл производства, требуется высокая квалификация станочников.

Тип производства определяют с помощью коэффициента закрепления операций  $K$ , определяемого по выражению:

$$K = \frac{O}{P},$$

где  $O$  – число операций, выполняемых в определенный период времени (например, в месяц);

$P$  – количество рабочих мест (станков).

Коэффициент закрепления операций для различных типов производства имеет следующие значения:

$K > 40$  – единичное производство;

$20 < K < 40$  – мелкосерийное;

$10 < K < 20$  – среднесерийное;

$1 < K < 10$  – крупносерийное;

$K = 1$  – массовое.

#### 1.4. Технологический процесс и его структура

Технологический процесс – это часть производственного процесса, направленная на изменение состояния предмета производства. В машиностроении различают технологические процессы механической, термической обработки деталей, сборки, контроля и окраски изделий.

Технологический процесс механической обработки направлен на изменение формы, размеров, точности и качества обрабатываемой детали.

Технологический процесс термической обработки направлен на изменение структуры и свойств материала.

Технологический процесс сборки определяет порядок сборки и контроля качества изделия.

Технологический процесс окраски устанавливает порядок и способ окрашивания деталей, узлов и изделия в целом.

Основной структурной единицей технологического процесса является операция.

Операция – это законченная часть технологического процесса, выполняемая на одном рабочем месте (станке, верстаке, сборочном стенде, малярной установке). Операция – это основная единица, принимаемая за основу расчета количества оборудования, производственной площади, потребляемой энергии, рабочей силы и других показателей.

В состав операции входят следующие структурные составляющие:

- установ,
- переход,
- ход,
- позиция.

**Установ** – часть операции, выполняемая при одном закреплении заготовки.

**Переход.** Различают два вида переходов – технологический и вспомогательный.

**Технологический переход** – это часть операции, связанная с обработкой одной поверхности детали, одним инструментом при неизменных режимах резания. Переходом считается также одновременная многоинструментальная обработка нескольких поверхностей. В этом случае переход связан с одной инструментальной наладкой.

**Вспомогательный переход** – часть операции, состоящая из действий, не связанных с изменением состояния предмета обработки, но необходимых для выполнения технологического перехода. К вспомогательному переходу относят установку и закрепление заготовки на станке, холостые пробеги суппорта станка, снятие детали со станка, смену инструмента.

Переход состоит из ходов – рабочих и вспомогательных.

**Рабочий ход** – часть технологического перехода в виде однократного перемещения инструмента относительно обрабатываемой поверхности заготовки. При этом в стружку снимается с поверхности один слой материала.

**Вспомогательный ход** – часть перехода в виде однократного перемещения инструмента относительно заготовки, не сопровождаемого изменением состояния предмета обработки, но необходимого для выполнения рабочего хода.

К вспомогательному ходу стоит отнести: позиционирование инструмента в исходное перед обработкой положение (холостой ход).

**Позиция** – фиксированное положение заготовки относительно инструмента при одном установе с целью выполнения перехода. Например, на фрезерном станке многопозиционная обработка имеет место при нарезании зубьев зубчатых колес с помощью делительной головки.

## Глава 2

# ТОЧНОСТЬ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

### 2.1. Понятие точности обработки

Точность обработки деталей оказывает огромное влияние на качество машин и механизмов. От точности зависит функциональная надежность и долговечность машин и приборов.

Изготовление деталей с заданной точностью позволяет осуществить принципы взаимозаменяемости в машиностроении, организовать поточно-механизированную сборку узлов и механизмов. Все это способствует уменьшению трудоемкости, снижению стоимости, а также позволяет эффективней выполнять ремонт машин в условиях эксплуатации.

Точность – это степень соответствия реально изготовленной детали заданным допускам и отклонениям размера, формы и расположения поверхности, установленным в чертеже.

Условно точность можно разделить на две категории: заданную и фактическую.

Заданная (до обработки) регламентируется чертежами и характеризуется допусками и отклонениями на размеры (кавалитеты), форму (некруглость, отклонения профиля), расположения поверхностей (радиальное и торцевое биение, несоосность).

Фактическая точность определяется погрешностью изготовления детали.

Погрешность – это разность между действительным и номинальным размерами. Оценка точности сводится к сопоставлению погрешности с допусками и отклонениями.

Методы обработки считаются удовлетворяющими требованиям точности, если погрешность обработки не превышает допускаемые отклонения размера, формы и расположения поверхности.

На появление погрешности при изготовлении деталей влияют три группы причин:

- не точная установка режущего инструмента на требуемый размер перед обработкой (не точное позиционирование инструмента при настройке на размер);
- погрешности при базировании и закреплении детали на станке;
- погрешности, возникающие непосредственно при обработке.

Настройка инструмента на размер осуществляется двумя способами:

- индивидуально, методом «пробных стружек»;
- автоматически, путем предварительной настройки.

Индивидуальная настройка осуществляется путем пробных рабочих ходов и последующего измерения детали, так называемым методом «пробных стружек». Способ широко применяется при единичном и мелкосерийном производстве.

Способ автоматической настройки осуществляется путем предварительной установки и выверки режущего инструмента в размер с помощью измерительных средств или шаблонов. Такой способ настройки преимущественно применяют на станках с ЧПУ, на станках-автоматах при крупносерийном и массовом производствах.

При базировании и закреплении заготовки на станке погрешности могут возникать вследствие неточности установки или деформирования детали при силовом воздействии в процессе её закрепления.

Но основная, большая часть погрешностей, образуется непосредственно в процессе обработки деталей.

## **2.2. Основные факторы, влияющие на точность при обработке деталей**

В процессе непосредственной обработки деталей на станках на точность оказывает влияние большое количество факторов, имеющих различную степень влияния, количественную значимость и разную векторную направленность.

К таким факторам относят:

### ***Неточность настройки кинематической схемы станка.***

Неточность настройки кинематической схемы станка вызывает появление систематической погрешности детали при обработке. Например, неудовлетворительный подбор зубчатых колес гитары станка может привести к погрешности шага резьбы при нарезании её на токарно-винторезном станке.

### ***Неточность станка в ненагруженном состоянии.***

Известно, что имеющиеся неточности станков при их изготовлении оказывают влияние на возникновение погрешностей обрабатываемых деталей. Нормы точности станков регламентируются стандартами, контролируются после сборки в ненагруженном состоянии и фиксируются в паспорте станков.

К таким нормам относят, например, радиальное биение шпинделя, параллельность и прямолинейность направляющих станины и другие показатели.

Из-за неточностей станков появляются отклонения размеров и формы обрабатываемых поверхностей деталей. Продольная погрешность формы обточенной поверхности появляется, например, в результате непрямолинейности направляющей станины в горизонтальной плоскости. Радиальное биение шпинделя приводит к образованию некруглости поверхности.

В настоящее время станкостроительная промышленность выпускает станки пяти классов точности: нормальной (Н), повышенной (П), высокой (В), особо высокой (А), а также особо точные станки (С).

В зависимости от заданной точности конкретных деталей для обработки выбирают станки соответствующего класса точности.

### ***Неточность мерного и фасонного инструмента.***

К мерному инструменту относят режущий инструмент, изготовленный с заданным нормированным размером, например, сверла, зенкеры, развёртки, протяжки, метчики, концевые, дисковые, угловые и другие фрезы. К фасонному

инструменту относят, например, фасонные резцы, фасонные шлифовальные круги и другой инструмент. Он содержит режущую часть сложной формы с радиусными кривыми и сопряжениями.

Неточность изготовления мерного и фасонного инструмента, его износ и ошибки при заточке влияют на точность изготавливаемых деталей. Например, при просверливании отверстия с заданным диаметром 20 мм сверлом, имеющим неточный размер 19,95 мм, отверстие будет иметь погрешность в диаметре 0,05 мм.

#### ***Деформация обрабатывающей системы.***

В процессе обработки деталей на станках на обрабатывающую систему (станок-приспособление-инструмент-деталь) действуют силы резания. Эти силы, воздействуя на систему, вызывают упругую и остаточную деформацию её частей. Возникающая деформация во многом зависит от состояния обрабатывающей системы, её износа и жёсткости, а также от значения действующих нагрузок.

Появление деформаций системы в процессе обработки деталей оказывает существенное и постоянно действующее влияние на точность.

#### ***Размерный износ режущего инструмента.***

При обработке заготовок на станках между режущим инструментом и обрабатываемой деталью имеет место значительное трение. Это трение вызывает износ инструмента. Износ инструмента, особенно износ по задней поверхности резцов, вызывает погрешности деталей при обработке. Фактор износа является постоянно действующим и существенным фактором, влияющим на точность обработки.

#### ***Тепловые деформации обрабатывающей системы.***

В процессе обработки деталей в зоне резания, в месте контакта режущего инструмента с обрабатываемой поверхностью, образуется интенсивное тепловое поле. Температура в этой зоне достигает от 800 до 1000 и более градусов. Тепловое поле распространяется на режущий инструмент и обрабатываемую деталь. Под действием тепла инструмент и деталь испытывают линейную температурную деформацию, оказывающую существенное влияние на точность обработки деталей.

При длительной работе станков происходит нагрев их отдельных частей из-за трения в подвижных частях механизмов. Этот нагрев может вызывать некоторое смещение шпиндельных бабок, столов, станин. Тепловое смещение узлов станка может влиять на образование погрешностей при обработке деталей.

#### ***Наличие внутренних напряжений в заготовках.***

В заготовках, полученных такими методами как литье,ковка, сварка, термическая обработка образуются, без приложения внешних сил, значительные по величине внутренние остаточные напряжения. Они возникают в результате неравномерного по сечению заготовки охлаждения и структурных превращений в металле. В отливках такие напряжения образуются вследствие кристаллизации металла с различной скоростью охлаждения, а в сварных изделиях из-за неравномерного нагрева и остывания в процессе сварки. В таких заготовках наблюдается межкристаллическая внутриструктурная напряженность, находящаяся довольно длительный период времени в равновесном состоянии.

При снятии слоя металла в процессе обработки заготовок, имеющих внутренние напряжения, нарушается равновесие в распределении напряжений по сечению

детали, что вызывает ее изгиб или коробление. На погрешность обработки остаточные напряжения особенно ощутимо влияют при изготовлении крупных деталей, таких как станины, рамы, а также при изготовлении тонкостенных и нежестких деталей. Чтобы снизить влияние остаточных напряжений в сварных изделиях, уделяют особое внимание способам наложения сварных швов и режимам сварки.

Для уменьшения влияния остаточных напряжений на точность обработки применяют следующие мероприятия:

Для снятия внутренних напряжений в крупных отливках используют естественное старение, заключающееся в вылеживании заготовок в течение года и больше на воздухе;

Для более малых и средних отливок применяют термическую обработку (отжиг), нагревая их до 500–600 °С и, после выдержки, подвергая заготовки медленному охлаждению со скоростью 20 °С в час.

При механической обработке заготовок, имеющих внутренние напряжения, после грубой обработки их снимают со станка, чтобы обеспечить естественное деформирование, выдерживают несколько часов и только после этого производят чистовую обработку.

Из всех многочисленных факторов, влияющих на точность обработки, доминирующими факторами являются: размерный износ инструмента, деформации обрабатываемой системы при силовом воздействии на нее, тепловое поле, сопровождающее обработку. Ниже эти постоянно действующие факторы будут рассмотрены более подробно.

### 2.3. Размерный износ инструмента и его влияние на точность

В процессе механической обработки деталей режущий инструмент подвергается изнашиванию по передним и задним поверхностям. Наибольшее влияние на точность оказывает износ по задней поверхности инструмента. При этом образуется погрешность  $U_p$  (рис. 2.1), стремящаяся увеличить размерный параметр заготовки. С целью прогнозирования погрешности от износа, образующейся при любом текущем значении времени работы инструмента, необходимо определить расчетную зависимость износа от пути резания.

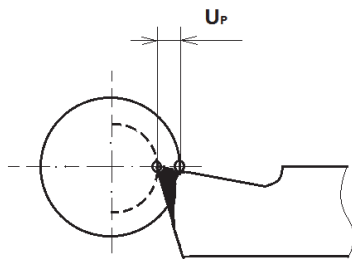


Рис. 2.1. Погрешность обработки от износа режущего инструмента

Для этого была использована закономерность износа инструмента (кривая Лоренца), показанная на графике (рис. 2.2).

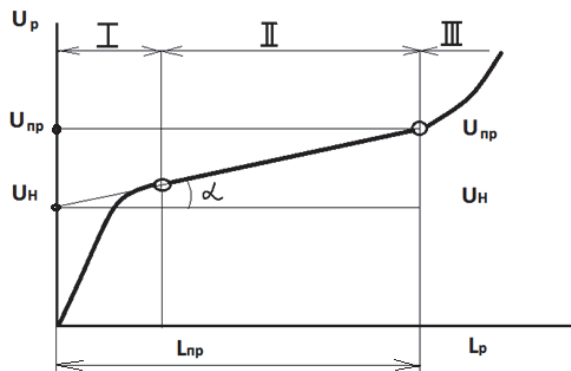


Рис. 2.2. Зависимость износа инструмента от пути резания

На графике видны три зоны износа: I зона интенсивного износа – кратковременный период приработки, II зона нормального износа и III зона повышенного (катастрофического) износа, за которым следует разрушение режущей кромки. Износ по окончании II периода называют предельно допустимым износом  $U_{пр}$ . Дальше этой точки работать режущим инструментом нецелесообразно. Если продлить прямую часть графика, соответствующую нормальному износу, до пересечения с осью ординат, то получим точку  $U_H$ . Эта точка соответствует износу за период приработки и называется начальным износом. Тогда уравнение прямой, не проходящей через начало координат, будет иметь следующий вид:

$$U_P = U_H + tgaL_P \quad (2.1)$$

При этом:

$$tga = \frac{U_{пр} - U_H}{L_{пр}} \quad (2.2)$$

где  $L_{пр}$  – путь резания до достижения предельного износа  $U_{пр}$ .

Интенсивность нормального износа характеризуется значением тангенса угла наклона кривой  $\alpha$  к оси абсцисс и называется относительным (удельным) износом  $U_0$ . Относительный износ обычно принимают на 1000 м пути резания и выражают в  $\frac{\text{МКМ}}{\text{КМ}}$

$$U_0 = \frac{(U_{пр} - U_H)1000}{L_{пр}} \quad (2.3)$$

Тогда уравнение износа можно выразить следующим образом

$$U_P = U_H + U_0 L_P \quad (2.4)$$



Путь резания можно рассчитать по выражению:

$$L_P = vt, \quad (2.5)$$

где  $v$  – скорость резания,  
 $t$  – время обработки детали.

При этом:

$$v = \frac{\pi D n}{1000}, \quad (2.6)$$

и

$$t = \frac{l}{ns} i, \quad (2.7)$$

где  $D$  – диаметр обрабатываемой детали,  
 $n, s$  – соответственно частота вращения детали и подача,  
 $l$  – длина обрабатываемой поверхности,  
 $i$  – число проходов резца.

Окончательный вид формулы для расчета пути резания при обработке нескольких деталей будет иметь следующий вид:

$$L_P = \frac{\pi D l i}{1000 s} N, \quad (2.8)$$

где  $N$  – количество обрабатываемых деталей.

Таким образом, износ можно определить по формуле (2.4.), при этом показатели  $U_H$  и  $U_0$  выбирают из справочника технолога в зависимости от условий резания и вида инструмента, а путь резания определяют по формуле (2.8).

Износ инструмента зависит от свойств обрабатываемого материала, качества инструмента и применяемых режимов резания.

Данные начального и относительного износа для прогнозирования точности обработки от износа можно использовать из следующей табл. 2.1.

Т а б л и ц а 2.1

Данные начального и относительного износа инструмента

Обрабатываемый материал	Инструментальный материал	Износ	
		Начальный $U_H$ , мкм	Относительный $U_0$ , мкм/км
Сталь углеродистая и легированная	Твердый сплав (Т15К6; Т30К4)	2–8	2–10
	Минералокерамический сплав ЦМ332	1–3	0,5–1,0
Чугун серый	Твердый сплав (ВК4, ВК8)	3–10	3–12
Закаленный чугун	Минералокерамический сплав ЦМ332	10	8

Для уменьшения влияния износа инструмента на точность обработки применяют более стойкие инструментальные материалы, используют рациональные режимы резания и смазочно-охлаждающие жидкости (СОЖ) при обработке.

## 2.4. Жесткость обрабатывающей системы и ее влияние на точность.

### Определение жесткости металлорежущих станков

Силы резания, действующие в процессе обработки деталей, вызывают деформацию (смещение) отдельных частей и узлов обрабатывающей системы. Возникновение деформации объясняется наличием зазоров в стыковых соединениях частей станка и упругой деформации деталей, приспособлений, инструмента.

Появление деформаций системы вызывает образование погрешностей при обработке деталей. И чем больше значение деформаций, тем ниже уровень точности обработки. Анализ влияния деформаций на точность обработки показывает, что значение деформации зависит от действующих на систему сил и от ее жесткости.

$$y = f(P_y, j), \quad (2.9)$$

где  $y$  – деформация системы,  
 $P_y$  – радиальная сила резания,  
 $j$  – жесткость системы.

В процессе обработки деталей сила резания может принимать переменное значение в связи с неравномерностью припуска, колебанием твердости материала, нестабильностью режимов резания и состоянием инструмента. Жесткость системы (станка), оказывающая наибольшее влияние на точность, для фиксированных условий обработки на данный момент можно считать конечной.

Повышение жесткости обрабатывающей системы является одним из важнейших требований повышения точности обработки.

Жесткостью называют способность системы оказывать сопротивление действующим на нее нагрузкам.

Жесткость  $j$  определяют по формуле:

$$j = \frac{P_y}{y}, \frac{H}{\text{мм}}, \frac{\text{кН}}{\text{мм}}. \quad (2.10)$$

Величина, обратная жесткости, называется податливостью  $W$ :

$$W = \frac{1}{j} = \frac{y}{P_y}, \frac{\text{мм}}{H}, \frac{\text{мм}}{\text{кН}}. \quad (2.11)$$

Деформация системы, как источник погрешностей обработки, прямо пропорциональна действующим нагрузкам и обратно пропорциональна жесткости системы:

$$y = \frac{P_y}{j} \quad (2.12)$$

Из выражения (2.12) видно, что для повышения точности обработки необходимо изготовление деталей осуществлять на более жестких станках.

Жесткость станков определяют двумя способами: *статическим и динамическим*.

Определение жесткости статическим способом производят на неработающем станке.

При этом динамометром нагружают заданной силой основные узлы станка и измеряют индикатором часового типа деформацию узлов, вызываемую приложенной силой. А затем после определения жесткости узлов переходят к расчету жесткости станка как системы в целом. Например, статическую жесткость металлорежущего токарно-винторезного станка определяют следующим порядком:

После нагружения и измерения деформации определяют жесткости узлов:  
– передней бабки:

$$j_{ПБ} = \frac{P_y}{y_{ПБ}}, \quad (2.13)$$

– задней бабки:

$$j_{ЗБ} = \frac{P_y}{y_{ЗБ}}, \quad (2.14)$$

– суппорта:

$$j_C = \frac{P_y}{y_C}, \quad (2.15)$$

где  $y_{ПБ}$ ,  $y_{ЗБ}$ ,  $y_C$  – деформации соответственно передней бабки, задней бабки, суппорта.

Затем определяют податливость  $W_{ст}$  станка по следующей формуле:

$$W_{ст} = \frac{1}{j_C} + \frac{1}{4} \left( \frac{1}{j_{ПБ}} + \frac{1}{j_{ЗБ}} \right). \quad (2.16)$$

Через податливость определяют жесткость  $j_{ст}$  станка:

$$j_{ст} = \frac{1}{W_{ст}} \quad (2.17)$$

Определение жесткости динамическим способом осуществляют во время работы станка (в динамике). При этом замеряют погрешность, например, эксцентриситет заготовки до начала обработки ( $\Delta_3$ ), а затем после обработки измеряют остаточную погрешность детали ( $\Delta_4$ ) (рис. 2.3).

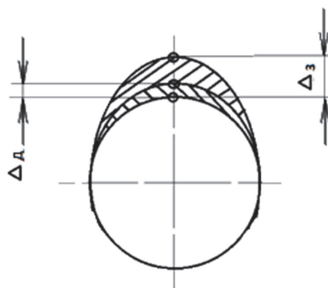


Рис. 2.3. Погрешность детали до и после обработки

Жесткость станка динамическим способом определяют по следующей эмпирической формуле, впервые предложенной профессором Соколовским Д.П.:

$$j_{ст} = \Delta_y \lambda C_p S^{0,75}, \quad (2.18)$$

где  $\Delta_y$  – «уточнение» – это отношение погрешности заготовки до обработки  $\Delta_3$  (см. рис. 2.3) к погрешности детали после обработки  $\Delta_d$ :

$$\Delta_y = \frac{\Delta_3}{\Delta_d}, \quad (2.19)$$

где  $\lambda$  – отношение радиальной силы резания к вертикальной (тангенциальной) ее составляющей,

$C_p$  – коэффициент, характеризующий условия обработки, например, при обработке заготовки из Ст50  $C_p = 190$ ,

$S$  – подача.

Жесткость выпускаемых промышленностью станков составляет 20–100 кН/мм, что соответствует податливости 0,05–0,01 мм/кН.

Для уменьшения влияния на точность упругих деформаций необходимо стремиться к созданию технологической системы с повышенной жесткостью, а для регулирования силы резания использовать по возможности станки с адаптивной системой управления.

## 2.5. Тепловые деформации обрабатывающей системы и их влияние на точность

В процессе обработки деталей на станках тепловое поле, возникающее в зоне резания, распространяется на режущий инструмент и обрабатываемую деталь.

Нагрев резца вызывает линейную температурную деформацию, оказывающую влияние на точность обработки.

Температурное удлинение резца вызывает погрешность, способствующую уменьшению размерного параметра (рис. 2.4).

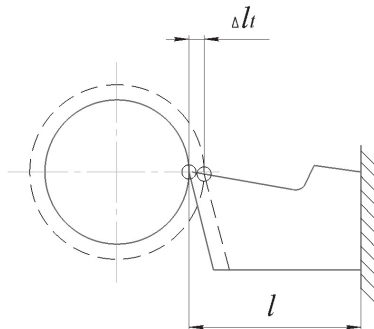


Рис. 2.4. Погрешность детали от температурного удлинения резца

В процессе резания в начальный короткий период времени удлинение резца интенсивно возрастает, а затем по мере дальнейшей работы стабилизируется, имея незначительный рост (рис. 2.5) в области температурного равновесия. Расчет температурного удлинения резца  $\Delta l_t$  производят по следующей эмпирической формуле:

$$\Delta l_t = G_t \frac{l}{F} \sigma_B (t \cdot s)^{0.75} \sqrt{v} \quad (2.20)$$

где  $G_t$  – температурный коэффициент,  
 $l$  – вылет резца,  
 $F$  – площадь поперечного сечения державки резца,  
 $\sigma_B$  – предел прочности обрабатываемого материала,  
 $t, s, v$  – параметры режима резания соответственно глубина резания, подача, скорость резания.

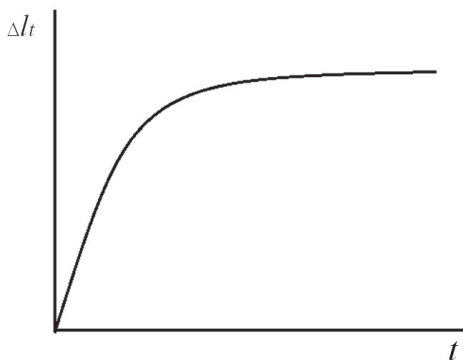


Рис. 2.5. Зависимость температурного удлинения резца от времени обработки детали

Часть теплоты, выделившейся в зоне резания, переходит в обрабатываемую деталь, вызывая изменение ее размеров и появление погрешности обработки. При равномерном нагревании изделия возникает погрешность размеров, а при неравномерном местном нагревании наблюдается коробление, приводящее к погрешности формы. Наибольший нагрев детали осуществляется при грубой интенсивной обработке. После грубой обработки детали снимают со станка, дают возможность им остыть до температуры окружающей среды и после этого производят чистовую обработку.

В процессе длительной работы станков их отдельные узлы могут нагреваться в результате трения подвижных частей. Равномерный нагрев вызывает линейную деформацию узлов, а неравномерный нагрев приводит к их взаимному смещению, что сказывается на точности обработки.

Для уменьшения теплового влияния на точность при обработке деталей применяют СОЖ, используют рациональные параметры режима резания и инструмент с оптимальными геометрическими углами заточки.

## 2.6. Методы расчета точности обработки

Аналитический расчет комплексной погрешности обработки деталей и универсальная оценка точности производства представляют собой сложную трудно решаемую задачу. Это связано с большим разнообразием факторов, влияющих на точность обработки и неоднозначностью их воздействия. Погрешности, которые образуются в процессе изготовления деталей, имеют различную векторную направленность, отличаются друг от друга по величине и значимости, имеют различную физическую природу образования.

Известны три метода расчета точности обработки:

- вероятно-статистический;
- расчетно-аналитический;
- расчетно-статистический.

### *Вероятностно-статистический метод*

Метод основан на использовании теории вероятностей и математической статистики, при этом в качестве исходных данных для расчета применяют результаты измерений деталей, обработанных данным методом в определенных производственных условиях в количестве заданной представительной партии (не менее 50 шт.).

Этот метод универсален и позволяет достоверно оценивать и исследовать точность. Однако он требует проведения довольно трудоемкого статистического эксперимента и экономически целесообразен для крупносерийного и массового производства.

### *Расчетно-аналитический метод*

Метод заключается в том, что точность оценивают по аналитическим и эмпирическим формулам, установленным для определенных условий технологического процесса обработки. Метод учитывает физические процессы образования погрешностей при обработке.

Однако сложность метода и отсутствие отдельных расчетных зависимостей для разнообразных процессов обработки ограничивают практическое применение этого метода.

### *Расчетно-статистический метод*

Метод основан на использовании достоинств вероятно-статистического и расчетно-аналитического методов. Этот метод позволяет определять погрешность обработки посредством оценки ее отдельных составляющих и расчетным, и статистическим путем.

При недостатке расчетных данных преимущественно используются вероятно-статистические параметры, а при наличии достаточно хороших расчетных данных их успешно применяют совместно со статистическими параметрами.

Точность, как известно, зависит от погрешностей, возникающих в данных условиях обработки.

Они могут быть различными по величине и по направлению действия.

Обобщенно погрешности разделяют на две группы:

- систематические (постоянные и переменные);
- случайные.

Систематические постоянные погрешности имеют постоянное значение, повторяющееся на каждой детали. Например, погрешность отверстия, просверленного не точно изготовленным сверлом.

Систематические переменные погрешности имеют переменные значения, но изменяются, как правило, по определенной закономерности (зависимости), например, погрешности, возникающие от размерного износа или температурного нагрева резца.

Случайные погрешности не постоянны по величине и знаку и возникают под влиянием случайных факторов, действующих при обработке.

Например, погрешности, возникающие при обработке заготовок с различными припусками, с разной твердостью материала, с неточной установкой режущего инструмента и др.

## **2.7. Вероятностно-статистический метод оценки точности**

На точность обработки влияет большое количество факторов, имеющих различную физическую природу.

Они вызывают погрешности, имеющие различное значение и разную направленность.

На практике чрезвычайно сложно учесть множество одновременно действующих факторов и аналитически рассчитать точность обработки от их совокупного воздействия. Поэтому для практических целей используют комплексные методы оценки точности.

Одним из таких методов является вероятностно-статистический метод.

В качестве исходных данных метод использует совокупность результатов измерений представительной партии деталей, обработанных на станке в данных производственных условиях.

Метод оперирует реальными числовыми значениями погрешностей изготовления деталей, полученными путем измерений. При этом не учитываются физические и другие причины возникновения этих погрешностей.

Для реализации вероятностно-статистического метода необходимо:

- провести статистический эксперимент, что означает обработать в заданных условиях на станке представительную партию деталей;
- измерить каждую деталь и определить погрешность обработки;
- обработать статистический ряд полученных данных числовых значений методами теории вероятности и математической статистики с построением гистограммы или полигона распределения погрешностей;
- рассчитать параметры распределения случайных величин (погрешностей);
- дать оценку точности обработки данным методом.

В результате обработки на станке партии деталей и последующего измерения каждой из них получают следующие исходные данные:

$n$  – размер обрабатываемой партии деталей;

$x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$  – погрешности деталей;

$x_{max}, x_{min}$ , – соответственно наибольшая и наименьшая погрешности;

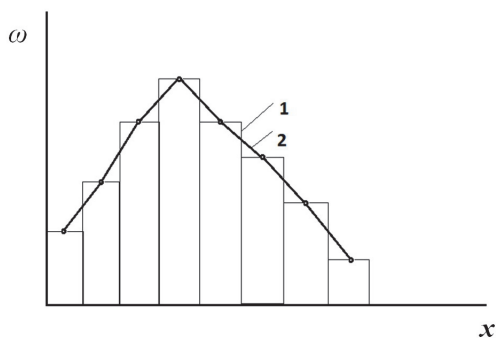
$\Delta_p = x_{max} - x_{min}$  – размах распределения погрешностей.

Для построения графика размах  $\Delta_p$  разбивают на равные интервалы и определяют частоту  $\omega_i$  повторения погрешностей в каждом интервале

$$\omega_i = \frac{m_i}{n},$$

где  $m_i$  – количество деталей с погрешностями, попавшими в данный интервал.

График (гистограмма 1 и полигон 2) приобретает следующий вид (рис. 2.6). На графике по оси абсцисс откладывают интервал погрешностей, а по оси ординат – частоту.



**Рис. 2.6.** Гистограмма и полигон распределения погрешностей обработки партии деталей

Если увеличить число размерных групп и число интервалов, а также увеличить количество обрабатываемых деталей в партии, то ломаная линия на графике станет плавной при  $n \rightarrow \infty$ , тогда  $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{m_i}{n} = y$ . В этом случае  $y$  становится функцией распределения случайных величин. Погрешности, полученные измерением деталей, возникающие от воздействия многочисленных факторов, считают в данном случае взаимно независимыми случайными величинами.

В связи с этим, экспериментально подтверждено, что распределение погрешностей обработки деталей на станках подчиняется закону нормального распределения. Этот закон отображается следующей кривой Гаусса (рис. 2.7), уравнение которой имеет следующий вид:

$$y = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x_i - \bar{x})^2}{2\sigma^2}}, \quad (2.21)$$

где  $\sigma$  – среднее квадратическое отклонение аргумента;

$\bar{x}$  – среднее значение погрешностей.



Эти показатели определяются по следующим формулам:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad (2.22)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (2.23)$$

Ордината наибольшего значения функции распределения  $y_{max}$  определяется по выражению:

$$y_{max} = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} = \frac{0,4}{\sigma} \quad (2.24)$$

Ординаты в точках А и В кривой (см. рис. 2.7) определяются:

$$y_A = y_B = \frac{y_{max}}{\sqrt{e}} = 0,6y_{max}, \quad (2.25)$$

или через  $\sigma$  их можно определить так:

$$y_A = y_B = \frac{y_{max}}{\sigma\sqrt{2\pi e}} = \frac{0,24}{\sigma} \quad (2.26)$$

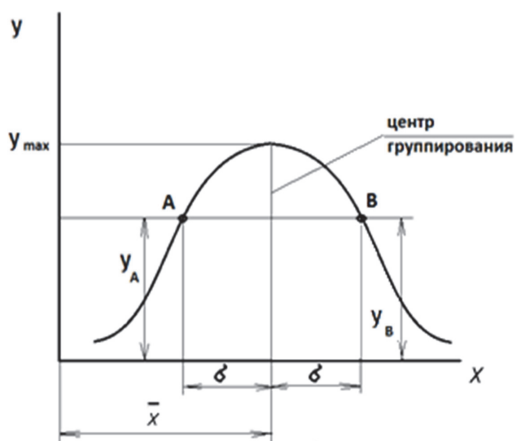
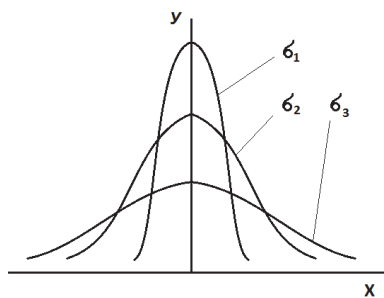


Рис. 2.7. Кривая нормального распределения случайных величин

Среднее значение погрешности  $\bar{x}$  показывает величину отклонения центра группирования от начала координат (см. рис. 2.7). Величина  $\sigma$  характеризует форму кривой распределения и является показателем рассеяния случайных величин и может служить мерой точности обработки данного метода. На графике (рис. 2.8) показаны кривые распределения, отображающие различные методы обработки. Чем больше рассеяние (разброс) погрешностей при обработке деталей, тем больше статистический показатель  $\sigma$  и значит меньше точность ( $\sigma_1 < \sigma_2 < \sigma_3$ , см. рис. 2.8).



**Рис. 2.8.** Кривые распределения с различной степенью разброса погрешностей

Найденные параметры  $\bar{x}$  и  $\sigma$  распределения позволяют оценить точность обработки исследуемого метода. В машиностроении установлено следующее соотношение между мерой заданной точности (допуском)  $T$  и средним квадратическим отклонением  $\sigma$ :

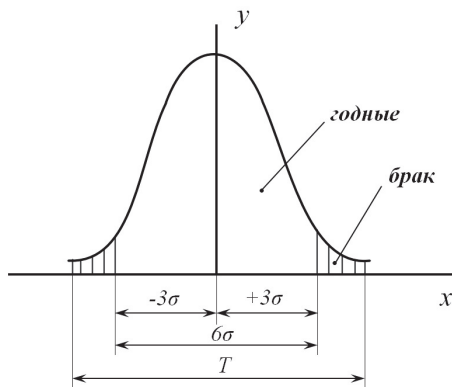
$$T \geq \pm 3 \sigma \quad (2.27)$$

$$T \geq |6 \sigma| \quad (2.28)$$

При распределении погрешностей по закону Гаусса процент ожидаемого брака при обработке деталей зависит от величины нормированного параметра распределения  $\sigma$ .

Если принять вместо  $\pm 3 \sigma$  меньшее значение, например  $\pm 2 \sigma$  или  $\pm \sigma$ , то процент брака будет соответственно 2 и 32. Поэтому для машиностроения и приборостроения принято значение  $\pm 3 \sigma$ . Это означает, что 99,73 % всех обработанных деталей, находящихся в интервале  $|6 \sigma|$ , будут годными, удовлетворяющими требованиям заданной точности, а брак не превысит 0,23 % (рис. 2.9).

Это соотношение означает, что вероятность изготовления деталей исследуемым методом будет отвечать заданным требованиям точности достаточно надежно.



**Рис. 2.9.** Иллюстрация вероятного количества годных и бракованных деталей при обработке партии заготовок

Таким образом, определив для исследуемого процесса обработки значение среднего квадратического отклонения  $\sigma$  можно установить точность метода по правилу «шести сигм».

## 2.8. Оценка точности с помощью точечных диаграмм

Вероятностно-статистический метод дает возможность достаточно достоверно и объективно оценить точность обработки деталей. Однако он не позволяет определить последовательного изменения погрешностей в процессе обработки, не позволяет установить закономерность изменения погрешности во времени от начала и до конца обработки данной партии деталей.

Этот недостаток исключается при использовании для оценки точности метода точечных диаграмм.

Суть метода заключается в следующем:

Также как и для вероятностно-статистического метода проводится статистический эксперимент. Обрабатывается партия деталей в данных производственных условиях.

Каждая деталь подвергается изменению и определяется ее погрешность.

Если обрабатывается большая партия деталей, то определяется среднее значение погрешности деталей, обработанных в заданном интервале.

Установленные погрешности или их средние значения наносят в виде точек на диаграмму (рис. 2.10). На этой диаграмме по оси абсцисс откладывают номера деталей или номера групп деталей в соответствующем интервале в порядке их обработки, а по оси ординат откладывают погрешности или их средние значения, соответствующие номерам деталей или номерам групп деталей заданного интервала.

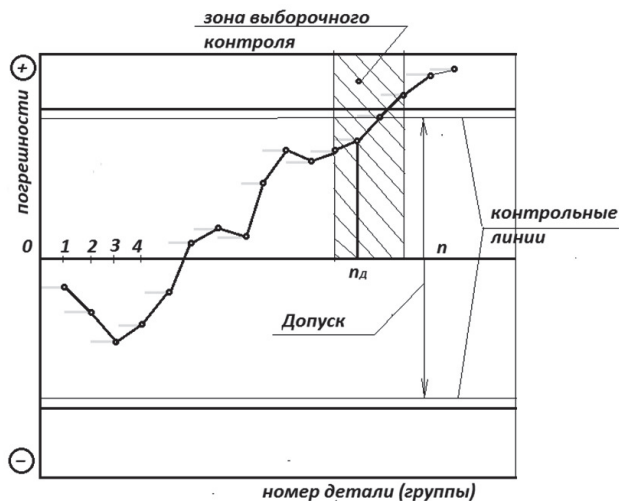


Рис. 2.10. Точечная диаграмма

На точечную диаграмму наносят верхнюю и нижнюю границы допуска, а также контрольные линии, сужающие допуск и являющиеся предупредительными границами. Детали, соответствующие заданным требованиям точности, не должны переходить этих границ.

Кривая, построенная по точкам на диаграмме, показывает, как изменяется погрешность в процессе последовательной обработки деталей.

Она отображает закономерность изменения точности во времени от начала и до конца обработки партии деталей. По этой кривой можно ориентировочно определить, какие факторы оказывают влияние на точность обработки деталей.

Для практических целей точечная диаграмма дает возможность:

– определить размер партии деталей, удовлетворяющей заданным требованиям точности ( $n_d$  – см. рис. 2.10);

– определить время (период)  $t_{пер}$  переналадки оборудования, смены изношенного инструмента для обработки последующей партии деталей:

$$t_{пер} = n_d t_0, \quad (2.29)$$

где  $t_0$  – время обработки одной детали.

– установить зону выборочного (статистического) контроля деталей обрабатываемой партии (заштрихованная часть – см. рис. 2.10).

Опыт показывает, что контролю (проверке на точность) подвергается 5–10 % деталей от партии.

Организация производства, особенно при использовании станков-автоматов, на основе проверки точности с помощью точечных диаграмм дает существенный экономический эффект и способствует повышению качества выпускаемых изделий.

## 2.9. Экономичная точность обработки

При обработке деталей с различной точностью изменяется трудоемкость и затраты (себестоимость) на ее изготовление. Известно, что изготовление детали с меньшим допуском требует больше затрат на ее обработку. Это объясняется тем, что возрастает основное время в связи с появлением дополнительных рабочих ходов и снижением режимов резания, увеличивается вспомогательное время, связанное с дополнительным контролем, установкой и выверкой заготовки, позиционированием режущего инструмента на размер; Кроме того применение более сложных и точных станков и высококачественного инструмента также ведет к возрастанию затрат.

Метод обработки имеет свою затратную (стоимостную) характеристику, которую можно выразить функцией, имеющей следующий графический вид (рис. 2.11) и описать уравнением:

$$Q = C_{\phi} T^{-a}, \quad (2.30)$$

где  $Q$  – затраты, связанные с обработкой,

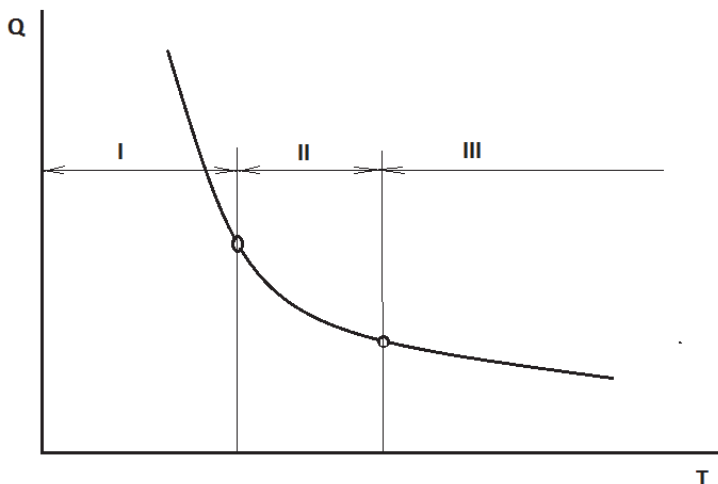
$T$  – допуск,

$C_{\phi}$  – коэффициент, учитывающий условия обработки,  
 $a$  – показатель степени.

Стоимостную характеристику (см. рис. 2.11) условно можно разделить на три зоны:

- I зона неэкономичной (невыгодной) обработки;
- II зона экономически возможного применения;
- III зона наименее затратной гарантированной точности обработки.

Изготовление деталей с высокой точностью требует применения более сложных технических средств и более дорогих приемов обработки, что влечет за собой большие затраты.



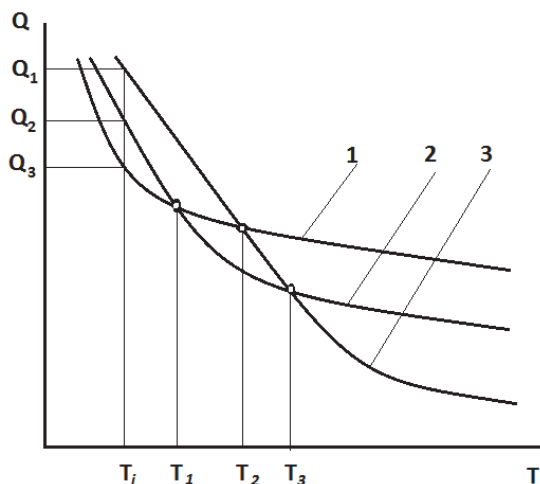
**Рис. 2.11.** Зависимость себестоимости от точности обработки

При проектировании технологии обработки и выборе необходимого оборудования целесообразно учитывать фактор экономической стоимости и правильно выбирать методы обработки.

При этом необходимо стремиться при получении заданной точности к минимальным затратам для ее достижения. При выборе конкурентных методов обработки сопоставляют их стоимостные характеристики и определяют тот из них, который имеет наименьшую себестоимость обработки при достижении заданной точности.

Это можно проиллюстрировать на графике (рис. 2.12), на котором приведены стоимостные характеристики, например, трех методов обработки (хонингование – 1, шлифование – 2, точение – 3).

На графике (см. рис. 2.12) на оси абсцисс показаны граничные точки  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$ , соответствующие допускам на пересечении кривых.



**Рис. 2.12.** Стоимостные характеристики различных методов обработки

Из графика видно, что если заданная точность  $T_i$  обработки высока, когда  $T_i < T_1$ , то целесообразно выбрать метод 1, так как затраты на обработку будут меньше, чем у двух других методов ( $Q_1 < Q_2 < Q_3$ ). Если заданный допуск  $T_i$  будет находиться между граничными точками  $T_1$  и  $T_3$  ( $T_1 < T_2 < T_3$ ), то наиболее экономичным оказывается метод 2, а когда задана невысокая точность ( $T_i > T_3$ ), то целесообразно выбрать метод 3.

Таким образом, экономичная точность обработки деталей достигается методом, имеющим наименьшие затраты по сравнению с другими методами.

## Глава 3

# КАЧЕСТВО ПОВЕРХНОСТИ И ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

### 3.1. Показатели качества поверхности и поверхностного слоя деталей

Практический опыт эксплуатации машин и механизмов убедительно подтверждает факт огромного влияния состояния поверхности и поверхностного слоя деталей на их эксплуатационные показатели.

Известно, что структура верхнего слоя деталей, наличие остаточных напряжений и шероховатость поверхности оказывают влияние на износостойкость и усталостную прочность деталей, испытывающих знакопеременную циклическую нагрузку. Например, во время работы колесной пары подвижного состава при больших циклических нагрузках и скоростях на осях могут образовываться микротрещины, которые, развиваясь, приводят к излому оси и к аварийной ситуации. Повышенная, например, шероховатость подступичной части при запрессовке оси и колеса приводит к снижению прочности прессового соединения деталей, а при работе подшипника скольжения и шейки снижает ресурс работы и долговечность подшипникового узла.

Состояние поверхности во многом определяет коррозионную стойкость и сказывается на свойствах деталей, работающих в условиях повышенных температур.

Влияние качества поверхности и поверхностного слоя деталей сказывается во всех сферах и направлениях эксплуатации машин.

Поэтому при изготовлении новых деталей и их ремонте обеспечивается обязательное выполнение требований к качеству поверхности.

Качество поверхности и поверхностного слоя деталей машин характеризуется:

- шероховатостью и волнистостью;
- физико-механическим состоянием поверхностного слоя.

При этом физико-механическое состояние оценивают тремя следующими показателями:

- твердостью (микротвердостью),
- структурой (микроструктурой),
- остаточными напряжениями.

### 3.2. Шероховатость и волнистость деталей

Качество поверхности деталей определяется совокупностью характеристик шероховатости и волнистости. Реальная поверхность детали образуется в процессе ее обработки и в отличие от номинальной поверхности, изображаемой на чертежах, имеет неровности различных форм и высоты.

Шероховатость относится к микрогеометрии поверхности, отклонения формы – к макрогеометрии, а волнистость занимает между ними промежуточное положение. Макрогеометрические отклонения рассматриваются на больших участках реальной поверхности деталей и характеризуют точность (овальность, конусообразность и др.). Микрогеометрия оценивается на малых участках реальной поверхности.

Отклонения формы поверхности условно различают в зависимости от отношения шага  $S$  к высоте поверхности  $H$ :

Так если  $\frac{S}{H} > 1000$  – макрогеометрические отклонения,

$\frac{S}{H} = 50 \div 1000$  – волнистость,

$\frac{S}{H} < 50$  – шероховатость поверхности.

В процессе обработки деталей резанием на обработанной поверхности образуются периодические неровности, которые принято называть шероховатостью.

**Шероховатость** – это совокупность неровностей с относительно малыми шагами на базовой длине. Базовая длина ограничивает участок поверхности детали с неровностями с целью количественного определения параметра шероховатости. В зависимости от значения шероховатости базовую длину выбирают из ряда, лежащего в пределах 0,01–25 мм.

По стандарту установлено шесть параметров шероховатости поверхности: среднее арифметическое отклонение профиля  $Ra$ , высота неровностей профиля по десяти точкам  $Rz$ , наибольшая высота неровности  $R_{max}$ , средний шаг выступов  $S_m$ , средний шаг неровностей по вершинам  $S$ , относительная опорная длина профиля  $t_p$ .

Параметры  $S_m$  и  $t_p$  характеризуют форму микронеровностей и определяют износостойкость и контактную деформацию сопряженных деталей. Шаговые параметры  $S_m$  и  $S$  находятся в диапазоне от 0,002 до 12,5 мкм, а опорная длина  $t_p$  от 10 до 90 %.

На практике шероховатость чаще всего оценивают параметрами  $Ra$  и  $Rz$ , характеризующими высоту и форму профиля. Стандарт распространяется на шероховатость поверхности со следующими интервалами числовых значений параметров:  $Ra = 100 \div 0,008$  мкм, а  $Rz = 1600 \div 0,025$  мкм.

При проектировании технологических процессов рекомендуется выбирать значения параметров шероховатости из числа их предпочтительных значений (табл. 3.1).

Т а б л и ц а 3.1

Выбор параметра шероховатости

Вид обработки	Значение параметра шероховатости, мкм	
	$Rz$	$Ra$
Предварительная (черновая)	50–400	12,5–100
Чистовая	1,6–25	0,4–6,3
Отделочная	0,025	0,012–0,2

При этом целесообразно устанавливать необходимую высоту шероховатости в зависимости от требуемой точности проектируемого сопряжения по следующим формулам при диаметре сопряжения:



больше 50 мм  $R_z = (0,1 \div 0,15)T$ ,  
от 18 до 50 мм  $R_z = (0,15 \div 0,20)T$ ,  
меньше 18 мм  $R_z = (0,20 \div 0,25)T$ .

где  $T$  – поле допуска в мкм.

Шероховатость образуется как след инструмента при взаимном его перемещении относительно обрабатываемой поверхности (рис. 3.1).

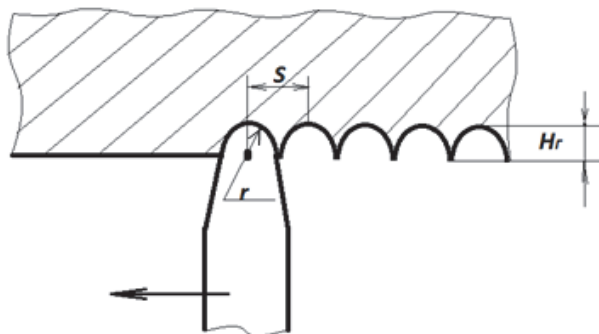


Рис. 3.1. Схема образования шероховатости поверхности

Величина и форма неровностей, состоящей из выступов и впадин, определяется подачей  $s$  и формой режущей части инструмента. Исходя из этого геометрическую (теоретическую) высоту неровностей  $H_r$  можно определить по следующей формуле Л.В. Чебышева:

$$H_r = \frac{s^2}{8r}, \quad (3.1)$$

где  $r$  – радиус при вершине резца (см. рис. 3.1).

Однако теоретическая высота неровностей не равна по своему значению реальной шероховатости, так как при расчете не учитываются температурный и силовой факторы, сопровождающие резание и влияющие на состояние поверхности  $H_r \sim R_z$ .

Фактическую (реальную) шероховатость определяют по эмпирическим зависимостям, имеющим следующий общий вид:

$$R_z = C \frac{s^y}{r^u}, \quad (3.2)$$

где  $C$  – коэффициент, учитывающий свойства обрабатываемого материала и условия обработки,

$y$  и  $u$  – показатели степеней при переменных.

Расчетные формулы для определения шероховатости выбирают из справочников технолога с учетом конкретных условий обработки деталей. Так,

например, шероховатость поверхности, полученную на токарном станке при обработке твердосплавным режущим инструментом – определяют по следующим формулам для деталей, изготовленных из:

$$\text{Стали } Rz = 0,21 \frac{S^{1,07}}{r^{0,65}}, \quad (3.3)$$

$$\text{Чугуна } Rz = 0,189 \frac{S^{1,1}}{r^{1,0}}, \quad (3.4)$$

На шероховатость поверхности, обработанной резанием, оказывает влияние большое число факторов, связанных с условиями изготовления детали. На высоту и форму неровностей влияют вид и режим обработки, свойства обрабатываемого материала, конструкция и геометрия режущего инструмента, состояние используемого оборудования и приспособлений.

Вид обработки определяет форму и схему расположения шероховатости на обрабатываемой поверхности, формируемых кинематикой движения инструмента относительно заготовки. Из параметров режима резания наибольшее влияние на шероховатость оказывает скорость резания и подача. Глубина резания не оказывает заметного влияния на шероховатость. В начальный момент с увеличением скорости резания  $v$  шероховатость  $Rz$  возрастает, а при дальнейшем увеличении скорости она заметно снижается (рис. 3.2). Наибольшего значения шероховатость достигает при скорости резания 20–25 м/мин. Это объясняется наличием повышенного нароста на передней поверхности инструмента при таких скоростях. С увеличением скорости резания высота нароста снижается, а в зоне скоростей больше 70 м/мин нарост почти не образуется, и шероховатость оказывается минимальной.

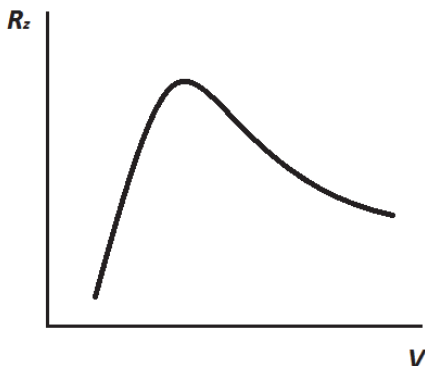
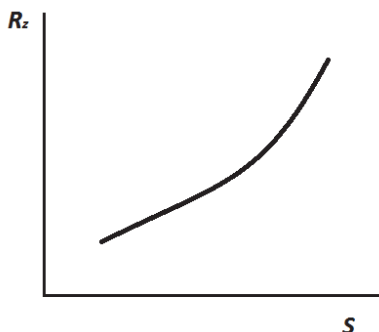


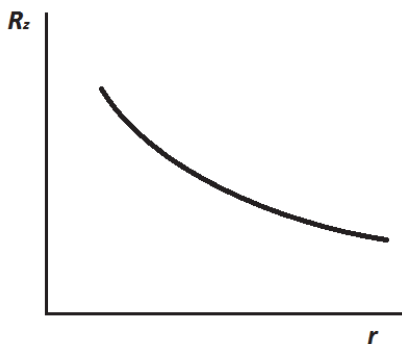
Рис. 3.2. Зависимость шероховатости от скорости резания

Наибольшее влияние на шероховатость оказывает подача  $s$ , что в значительной степени обусловлено пластическими и упругими деформациями в поверхностном слое, а также геометрическими параметрами инструмента (рис. 3.3).



**Рис. 3.3.** Зависимость шероховатости от подачи

Форма режущего лезвия инструмента совместно с подачей оказывает существенное влияние на шероховатость. Увеличение главного угла в плане  $\varphi$  инструмента приводит к росту высоты неровностей, а увеличение радиуса при вершине резца  $r$  наоборот снижает шероховатость (рис. 3.4).



**Рис. 3.4.** Зависимость шероховатости от радиуса при вершине резца

Свойства обрабатываемого материала, его структура оказывает существенное влияние на форму и высоту неровностей обработанной поверхности. Более вязкие пластичные материалы, склонные к пластическим деформациям, дают при их обработке резанием грубые и шероховатые поверхности.

Значительно меньшая шероховатость образуется при обработке стали после нормализации и отпуска, имеющей однородную и мелкозернистую структуру. Установлено, что с увеличением твердости обрабатываемого материала высота шероховатости снижается. Большое влияние на шероховатость оказывает состояние станка.

Новые и хорошо отрегулированные станки, установленные на массивных фундаментах, жесткие, изолированные от источников вибраций, обеспечивают