

**Ш. А. БУРЧАКОВ**

# **ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ**



«Инфра-Инженерия»

УДК 621.9  
ББК 34.5  
Б91

*Рецензенты:*

кандидат технических наук, профессор кафедры энергетического машиностроения Казанского государственного энергетического университета *А. В. Титов*;  
кандидат технических наук, главный конструктор научно-производственного предприятия «Авиатехника» *Б. А. Кесель*

**Бурчаков, Ш. А.**

**Б91**      Технология машиностроения : учебное пособие / Ш. А. Бурчаков. – Москва ; Вологда : Инфра-Инженерия, 2023. – 320 с. : ил., табл.  
ISBN 978-5-9729-1204-9

Изложены теоретические и практические вопросы изготовления деталей машин. Рассмотрены вопросы точности партии деталей, простановки размеров, включая зависимые допуски, расчёт операционных размеров на основе размерного анализа технологического процесса. Изложены технологические процессы формирования качества поверхностного слоя: методы поверхностно-пластической деформации, обработка свободным абразивом. Рассмотрены процессы электроэрозионной и электрохимической размерной обработки. Представлены справочные материалы для выполнения лабораторных работ и практических занятий.

Для студентов, обучающихся по направлению 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника», профиль подготовки: «Энергетика теплотехнологий» по дисциплине «Технология машиностроения».

УДК 621.9  
ББК 34.5

ISBN 978-5-9729-1204-9

© Бурчаков Ш. А., 2023  
© Издательство «Инфра-Инженерия», 2023  
© Оформление. Издательство «Инфра-Инженерия», 2023

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>1. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ И ПОНЯТИЯ ТЕХНОЛОГИИ МАШИНОСТРОЕНИЯ .....</b>	<b>3</b>
1.1. Термины и определения. Точность в машиностроении .....	3
1.1.1. Термины и определения .....	3
1.1.2. Точность в машиностроении.....	6
1.2. Базирование заготовок в машиностроении .....	35
1.2.1. Теоретические схемы базирования .....	36
1.2.2. Погрешность базирования заготовок .....	46
1.2.3. Назначение технологических баз .....	54
1.3. Качество поверхностного слоя деталей машин .....	58
1.3.1. Параметры, определяющие качество поверхностного слоя .....	58
1.3.2. Процессы формирования качества поверхностного слоя.....	76
1.3.2.1. Процессы обеспечения чистоты поверхности детали.....	76
1.3.2.2. Процессы поверхностно-пластической деформации детали.....	78
Вопросы для самоконтроля .....	90
<b>2. РАЗМЕРНЫЙ АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ .....</b>	<b>93</b>
2.1. Технологические размерные цепи. Простановка размеров .....	93
2.1.1. Технологические размерные цепи.....	93
2.1.1.1. Основные термины и определения, классификация размерных цепей .....	93
2.1.1.2. Основное уравнение размерной цепи .....	97
2.1.1.3. Задачи и методы расчета размерных цепей .....	98
2.1.2. Простановка размеров .....	110
2.1.2.1. Методы простановки размеров.....	110
2.1.2.2. Простановка размеров при наличии механически необрабатываемых поверхностей деталей .....	119
2.1.2.3. Зависимые допуски .....	121
2.2. Припуски и допуски на обработку .....	143
2.3. Расчёт операционных размеров с использованием графов .....	148
2.3.1. Построение графов.....	148
2.3.2. Расчет размерных цепей.....	157
Вопросы для самоконтроля .....	169

<b>3. МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ</b> .....	172
3.1. Обработка свободным абразивом .....	172
3.1.1. Сущность абразивной обработки, абразивные материалы .....	173
3.1.2. Методы обработки деталей свободными абразивами .....	178
3.2. Электроэрозионная обработка металлов .....	229
3.2.1. Электроискровая и электроимпульсная обработка .....	229
3.2.2. Электроискровое легирование .....	258
3.2.3. Электроконтактная обработка .....	263
3.3. Электрохимическая обработка металлов .....	269
Вопросы для самоконтроля .....	293
<b>Приложение</b> .....	296
<b>Список литературы</b> .....	310

# 1. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ И ПОНЯТИЯ ТЕХНОЛОГИИ МАШИНОСТРОЕНИЯ

## 1.1. Термины и определения. Точность в машиностроении

### 1.1.1. Термины и определения

Технология машиностроения – это наука об изготовлении машин требуемого качества в установленном производственной программой количестве в заданные сроки при наименьших затратах труда и наименьшей себестоимости.

Слово «технология» происходит от двух греческих слов: «*techne*» – мастерство и «*logos*» – наука. Говоря иначе, технология – наука о мастерстве, о способах производства различных изделий.

Технология машиностроения является комплексной инженерной дисциплиной и базируется на дисциплинах инженерная графика, материаловедение, детали машин, теория резания, металлорежущие станки, инструменты, допуски и технические измерения, техническая физика, и ряд других общетехнических наук.

Вместе с тем, технология машиностроения это прикладной наукой. Объектом технология машиностроения является машиностроительное производство. Машиностроительное производство – производство с преимущественным применением методов технологии машиностроения при выпуске изделий (ГОСТ 14004–83).

В машиностроении различают производственный и технологический процессы. Производственный процесс представляет собой совокупность всех действий людей и орудий производства, в результате которых исходные материалы и полуфабрикаты превращаются в изделия.

Технологический процесс – часть производственного процесса, содержащая целенаправленные действия по изменению и (или) определению состояния предмета труда (ГОСТ 3.1109-82).

В соответствии с ГОСТ14.004-83 [53], в зависимости от широты номенклатуры, регулярности, стабильности и объема выпуска изделий, современное производство подразделяется на различные типы – единичное, серийное (мелко-, средне- и крупносерийное) и массовое. Тип производства характеризуется коэффициентом закрепления операций:  $K_{30} = P/O$ , где  $P$  – число рабочих мест, на которых выполняют технологические операции;  $O$  – число технологических операций. Коэффициент закрепления операций, в соответствии с ГОСТ 3.1121-84 [54], принимают для массового производства равным 1, для

крупносерийного производства – свыше 1 до 10 включительно, для среднесерийного производства – свыше 10 до 20 включительно; для мелкосерийного производства – свыше 20 до 40 включительно. Единичное производство коэффициентом закрепления операций не нормируется. Оно определяется самим характером производства.

*Единичное производство* – производство, характеризующееся малым объемом выпуска одинаковых изделий, повторное изготовление и ремонт которых, как правило, не предусматривается [53].

Для единичного производства характерны следующие основные технологические признаки: широкая номенклатуры изготавливаемых или ремонтируемых изделий; малым объемом выпуска изделий; использование универсального оборудования и технологической оснастки; расположение оборудования по технологическим группам (токарный, фрезерный, сверлильный, зуборезный и т. п.). На рабочих местах выполняются разнообразные технологические операции; заготовки в процессе обработки переходят с одного участка на другой; заготовки невысокой точности с большими припусками (литье в землю, горячий прокат, поковки); требуемая точность достигается методом пробных ходов и промеров с использованием разметки; широко применяется пригонка по месту; квалификация рабочих очень высокая; технологический процесс обработки деталей в единичном производстве, как правило, не разрабатывается подробно, а ограничивается установлением перечня операций с указанием станков, приспособлений и инструментов; применяется опытно-статистическое нормирование труда. Изделия изготавливаются по спецзаказам не для широкого потребления. Примерами является производство турбин для гидроэлектростанций, атомных реакторов, шагающих экскаваторов, ледаколов.

*Серийное производство* – производство, характеризующееся изготовлением или ремонтом изделий периодически повторяющимися партиями [53]. Примерами таких изделий являются станки, авиационные двигатели, большегрузные автомобили, компрессоры и т. п. Серийное производство наиболее распространено в общем и среднем машиностроении: до 80 % продукции машиностроения это продукция серийного производства.

В зависимости от количества деталей или изделий в серии производство условно делят на мелко-, средне- и крупносерийное. Для серийного производства характерно: использование универсального, с ЧПУ и специализированного оборудования; применение нормального и специального режущего и измерительного инструмента; употребление специализированных приспособлений и частично разметки; внедрение полной и частичной взаимозаменяемости и до полного сокращения пригоночных работ; нормирование припусков; разработка детальных технологических процессов (маршрутных или маршрутно-

операционных); наличие технического нормирования. При серийном производстве целесообразно применять предметную форму организации производства (участки обработки корпусных деталей, валов, втулок, зубчатых колес и т. п.). Станки располагаются в последовательности выполнения технологических операций, заготовки на каждом станке обрабатываются партиями. После обработки партия заготовок поступает к следующему станку или на промежуточный склад. В условиях среднесерийного производства оборудование может быть расположено в последовательности выполнения технологического маршрута с оснащением оборудования групповыми наладками оснастки с возможностями ее переналадки.

*Массовое производство* – характеризуется большим объемом выпуска изделий, непрерывно изготавливаемых или ремонтируемых продолжительное время, в течение которого на большинстве рабочих мест выполняется одна рабочая операция [53].

Массовое производство свойственно для автомобильной, автотракторной и шарикоподшипниковой промышленности, сельскохозяйственного машиностроения, приборостроения и др. Для него характерно:

- выполнение на каждом рабочем месте только одной закрепленной за ним периодически повторяющейся операции;
- использование специального и специализированного высокопроизводительного оборудования (станков-автоматов), которое расставляется по поточному принципу (т. е. по ходу технологического процесса) и во многих случаях связывается транспортирующими устройствами и конвейерами (применение агрегатных, автоматических и специальных станков, а также автоматических, роторных и роторно-конвейерных линий);
- применение высокопроизводительных приспособлений специального назначения; наличие полной взаимозаменяемости и отсутствие разметки;
- разработка подробного технологического процесса и ведение точного нормирования;
- использование точных индивидуальных исходных заготовок с минимальными припусками на механическую обработку (литье под давлением и точное литье, горячая объемная штамповка и прессовка, калибровка и т. п.). На настроенных станках и автоматах работают рабочие-операторы сравнительно низкой квалификации. Одновременно в цехах трудятся высококвалифицированные наладчики станков, специалисты по электронной технике и пневмогидроавтоматике. Массовое производство возможно и экономически выгодно при выпуске большого количества деталей, конструкция которых не меняется в течение длительного срока (3-4 года и более).

### *1.1.2. Точность в машиностроении*

Основные показатели качества машин определяются точностью их изготовления. Точность в машиностроении – это степень соответствия изготавливаемых изделий (деталей, узлов, машин, приборов) заранее установленным параметрам, задаваемым чертежом, техническими условиями, стандартами. Точность это качественный показатель, т. е., говоря о точности, употребляют выражения «высокая точность», «низкая точность» и т. д. В процессе изготовления деталей и сборки узлов и машин неизбежны погрешности, поэтому достижение абсолютной точности невозможно. Далее будем рассматривать вопросы технологии деталей. Действительные отклонения (разность) параметров реальной детали от их заданных номинальных значений называют погрешностями изготовления. Погрешность – количественный показатель точности. Различают точность и погрешность размера, формы и взаимного расположения элементов детали относительно друг друга (ГОСТ 2.308-79, ГОСТ 24642-81, ГОСТ 24643-81). Самостоятельно определяется точность детали по шероховатости поверхности.

К факторам, определяющим возможность возникновения погрешностей при механической обработке, относят: точность станков, приспособлений, инструмента; жесткость технологической системы СПИД, тепловое состояние звеньев технологической системы; размерный износ режущего инструмента; погрешность установки заготовки на станке; установку размера обработки; внутренние напряжения в материале заготовки и детали, неравномерность припуска и другие первичные погрешности.

При механической обработке различных деталей на металлорежущих станках различают достижимую и экономическую точность для данного способа обработки и типа станка. Достижимой является максимальная точность, которая может быть обеспечена при обработке заготовок без ограничения времени и материальных затрат при благоприятных условиях рабочим высокой квалификации на соответствующем станке. Обеспечение такой точности связано с большими затратами и, как следствие, повышение точности механической обработки приводит к увеличению себестоимости ее изготовления. Область применения – опытное и ремонтное производство. Каждому способу механической обработки соответствуют определенные пределы точности, ограничивающие экономическую целесообразность его реализации.

Экономической называют точность при данном способе механической обработки с учетом программы выпуска, которую можно получить в нормальных производственных условиях при обеспечении высокой производительности и стоимости обработки, не превышающей стоимости обработки при других возможных сопоставимых способах. Экономическая точность используется при



назначении технологических допусков. Значения экономической точности механической обработки поверхностей различными способами приводятся в технологических справочниках. Каждому способу обработки соответствует свой экономический квалитет точности, например, черновая обработка – 13–15-й квалитеты, чистовая – 6–8-й, отделочная – меньше 6-го.

Погрешности размеров деталей регламентируются предельными отклонениями в соответствии с системой допусков. Точность деталей машин определяет технологию их изготовления, сборки, а также влияет на выбор измерительных средств.

Степень точности называется квалитет (quality – качество). Квалитет (степень точности, standard tolerance grade) – совокупность допусков, рассматриваемых как соответствующие одному уровню точности для всех номинальных размеров [58].

Допуск определяется по зависимости

$$T = ai,$$

где  $a$  – коэффициент, зависящий от квалитета. Чем больше квалитет, тем больше  $a$ ;  $i$  – единица допуска, которая увеличивается с увеличением размера  $D$  [32];  $i = 0,45\sqrt[3]{D} + 0,001D$ .

Тогда следует, что при одной степени точности (одного квалитета) с увеличением размера допуск увеличивается. Физически это объясняется тем, что чем больше размер, тем труднее его выполнить с той же погрешностью, что и меньший размер. Другими словами, выполнение  $D_1 > D_2$  с одинаковой погрешностью означает, что  $D_1$  выполнено точнее  $D_2$ .

Различают точность одной детали и точность партии деталей. Точность одной детали, с учетом номинального размера, измеряется ее погрешностью, а партии деталей – полем рассеивания размеров и мерой положения поля рассеивания. Так как мера положения поля рассеивания размеров при изготовлении деталей на станках поддается регулированию, то принято точность партии деталей определять по полю рассеивания размеров, которое находится как разница между максимальным и минимальным размерами.

Требуемая точность механической обработки может быть обеспечена методом пробных рабочих ходов и методом автоматического получения размера на предварительно настроенном станке. При первом методе рабочий, затрачивая довольно много времени, несколькими пробными проходами и измерениями добивается требуемой точности, причем точность обработки будет зависеть главным образом от опыта и искусства рабочего. В связи с перечисленными не-

достатками метод пробных промеров и ходов используется, как правило, при единичном или мелкосерийном производстве изделий, в опытном производстве, а также в ремонтных и инструментальных цехах. Особенно часто этот метод применяется в тяжелом машиностроении. При серийном производстве этот метод находит применение для получения годных деталей из неполноценных исходных заготовок («спасение» брака по литью и штамповке). В условиях крупносерийного и массового производства метод пробных ходов и промеров используется главным образом при шлифовании, так как позволяет без труда компенсировать износ абразивных инструментов, часто протекающий неравномерно и вызывающий потерю точности обработки. При повышении качества абразивов и достижении их однородности, а также при создании систем автоматической компенсации износа кругов метод пробных ходов и промеров должен быть вытеснен также и из шлифовальных операций.

Метод автоматического получения размеров основан на предварительной настройке станка на определенный размер с применением соответствующих режущих инструментов и специальных приспособлений. При этом методе точность обработки будет зависеть в основном от точности настройки станка и погрешностей, присущих данному методу обработки. Метод применяется на станках с ручным управлением и ЧПУ. Этот способ производителен и используется в серийном и массовом производствах.

Все элементарные (первичные) погрешности при механической обработке можно разделить на систематические и случайные. Систематической называют такую погрешность, которая для всех деталей рассматриваемой партии остается постоянной или же закономерно изменяется при переходе от каждой обрабатываемой детали к следующей. Если биение развертки приводит к разбивке (увеличению отверстия детали), то эта погрешность будет примерно одинаковой у всех деталей данной партии, т. е. будет систематической. Систематическая постоянная может возникать также, например, при обработке отверстий в случае, если ось шпинделя сверлильного станка не перпендикулярна плоскости стола, на котором установлена заготовка. Тогда ось отверстия не будет перпендикулярна к торцевой поверхности детали. Пробными измерениями нескольких обработанных деталей эти погрешности выявляются и соответствующими мероприятиями сводятся к минимуму или устраняются. Систематические закономерно изменяющиеся (переменные) погрешности влияют на точность или непрерывно, или периодически. Например, непрерывное влияние оказывает размерный износ режущего инструмента. Знание закона изменения этих погрешностей позволяет устранить их или уменьшить.

Случайной называется такая погрешность, которая для различных деталей рассматриваемой партии будет иметь различные значения, причем ее возникно-

вание не подчиняется видимой закономерности. Например, при обтачивании партии заготовок появятся погрешности по наружному диаметру из-за колебания припуска на обработку, нестабильности твердости и состояния обрабатываемого материала, из-за неточности станка, приспособлений и т. п. Такие погрешности будут случайными. Наличие случайных погрешностей приводит к рассеянию размеров деталей, т. е. одноименные размеры различных деталей рассматриваемой партии не совпадают между собой. От случайной погрешности необходимо отличать погрешности, обусловленные грубыми ошибками, например, неправильной установкой инструмента.

Суммировать погрешности необходимо по следующим правилам: систематические погрешности складываются алгебраически, систематическая погрешность со случайной – арифметически, случайные погрешности – квадратично. Арифметическая сумма является наибольшей и предельной. Она больше или равна алгебраической сумме. Арифметическая сумма больше квадратичной суммы, что следует из теоремы Пифагора.

Определение точности обработки является сложной задачей. Для ее решения применяют расчетно-аналитический и статистический методы. Расчетно-аналитический метод базируется на исследовании факторов, вызывающих первичные погрешности обработки. Достоинством этого метода является то, что можно выявить факторы, вызывающие первичные погрешности, и наметить пути их уменьшения. Расчетно-аналитический метод предполагает проводить оценку точности по аналитическим или эмпирическим формулам для сугубо определенных условий выполнения технологического процесса. Метод позволяет учитывать физические явления в рассматриваемом процессе; выявлять причины образования погрешностей, но недостаток необходимых расчетных формул для разнообразных конкретных процессов ограничивает практическое применение этого метода.

Статистический метод позволяет оценить действие в данной операции сразу всей совокупности факторов. При этом нет необходимости проводить эксперименты по выявлению влияния отдельных факторов на точность обработки; достаточно на основе непосредственного наблюдения на производстве по данному геометрическому параметру измерить партию деталей. Каждый из этих методов имеет свою область применения, и они не исключают, а, наоборот, дополняют друг друга.

Одной из погрешностей при обработке детали является погрешность, обусловленная упругими отжатыми технологической системы. Упругие отжаты определяются жёсткостью оборудования.

*В качестве примера, рассмотрим определение жёсткости токарного станка производственным методом.*

Для выполнения заданных функций металлообрабатывающее оборудование должно быть прочным, жестким и устойчивым.

Прочность – это способность конструкции (или материала) – сопротивляться пластическим деформациям и разрушениям под действием приложенных к ней нагрузок.

Расчет на прочность – определение предельной нагрузки на элемент, при превышении которой происходит его разрушение. Под нарушением прочности понимается не только разрушение конструкции, но и возникновение в ней больших пластических деформаций.

Жесткость – это способность конструкции (или материала) сопротивляться упругим деформациям при внешнем воздействии. Целью расчета на жесткость является определение нагрузок и размеров деталей, при которых исключается возможность появления недопустимых с точки зрения нормальной работы конструкции деформаций (прогибов, удлинений, углов поворота).

Устойчивость – это способность конструкции сохранять положение равновесия, отвечающее действующей на нее нагрузке.

Согласно условию прочности максимальные действительные напряжения, возникающие вследствие действия внешних сил, не должны превышать допускаемых. По условию жесткости должны быть ограничены величины деформаций: абсолютная или относительная действительная деформация не должна превышать допускаемую.

Допустимые деформации деталей ограничивают упругими деформациями. Так как величины допускаемых напряжений определяются величиной допустимых деформаций, при расчетах обычно используют условие прочности, которое включает в себя условие жесткости.

Актуальность критерия жесткости непрерывно возрастает, так как совершенствование материалов идет по линии увеличения прочностных характеристик, а модуль упругости остается без изменения. Недостаточная жесткость и связанные с ней повышенные деформации могут вызвать потерю работоспособности конструкции по различным причинам. Например, для валов деформации изгиба и кручения превышающие норму приводят к неравномерному распределению нагрузки по длине зубьев, а цапфы вала перекашиваются в опорах, что ведет к ухудшению условий работы подшипников, неравномерному износу вкладышей. Недостаточная жесткость корпусных деталей нарушает взаимодействие размещенных в них механизмов, вызывая повышенное трение и износ в кинематических парах, появление вибраций. Недостаточная жесткость валов и опор зубчатых передач изменяет нормальное зацепление колес, что приводит к быстрому усталостному выкрашиванию и износу их рабочих поверхностей. В металлообрабатывающих станках, выполняющих точные операции, недоста-

точная жесткость системы станок – приспособление – инструмент – деталь (СПИД) не позволяет получить размеры с заданной точностью. Недостаточная жесткость также увеличивает возможность возникновения в процессе резания вибраций, источником которой являются вращающиеся частей станка, вращающиеся заготовка, прерывистый характера процесса резания. Конструкция может быть прочной, но не жесткой.

Жесткость входит в число важнейших для оценки работоспособности машин и механизмов. Он не менее (а иногда и более) важен, чем износостойкость, предел прочности, ударная вязкость. Её значение крайне велико для оборудования, где требуется высокая точность и высокая производительность обработки. Именно поэтому обрабатывающие станки обычно являются более металлоемкими изделиями (имеют большую массу) чем машины иного назначения той же мощности, так как жесткость зависит от размеров поперечного сечения детали. Это объясняется тем, что модуль упругости при увеличении материалоемкости растет медленнее чем прочностные параметры. Так, обеспечив гарантированно достаточный запас прочности механизма (например, при замене углеродистой стали на легированную) возможна ситуация, когда необходимая сопротивляемость деформациям достигнута не будет из-за незначительности роста модуля упругости (а именно от него она и зависит).

Когда рассматривается вопрос о проектировании технологических систем для обработки резанием, в условиях силового нагружения исходят из норм жесткости. Нормы жесткости являются законом для конструктора. Размеры деталей и технологической системы в целом определяются не по критерию прочности, а по критерию жесткости. Критерий прочности в этом случае обеспечивается автоматически.

Роль жесткости для металлообрабатывающего оборудования несоизмеримо шире и глубже критерия прочности. Жесткость определяет не только размеры, но и качество конструкции в целом.

Жесткость узлов новых станков достигается 20–100 кН/мм, что соответствует податливости 0,05...0,01 мм/кН. В отдельных случаях жесткость узлов изношенных и разрегулированных станков бывает ниже 10 кН/мм. В общем, увеличение жесткости достигается следующими основными путями:

1. Уменьшением количества узлов в конструкции станков и приспособлений.
2. Предварительной затяжкой у станков постоянно контактируемых деталей.
3. Улучшением качества сборки узлов, тщательной пригонкой сопряженных поверхностей и регулировкой зазоров.

4. Повышением жесткости деталей технологической системы вследствие уменьшения их высоты или вылета и увеличения размеров опорной поверхности.

5. Использованием дополнительных опор, люнетов и других опорных элементов для заготовок и инструментов.

Исследования показали, что деформации самих деталей узлов станка играют незначительную роль в общей величине его отжима под действием нагрузки. Упругие отжатия зависят главным образом от качества пригонки стыковых поверхностей, состояния регулирующих деталей (клиньев, компенсаторных колец, планок) и качества сборки.

Жесткость токарных станков зависит от типоразмера станка, изношенности станка, качества регулировки станков, схемы работы, посадки патрона на шпиндель, от отношения  $P_y/P_z$ . Наибольшее влияние на жесткость токарного станка оказывает суппорт, так как он имеет наибольшее число стыков, в том числе подвижных. Жесткость шпиндельного узла (передней бабки) зависит от способа посадки патрона на шпиндель. Посадка на резьбовой конец снижает его жесткость, а фланцевая посадка увеличивает ее. Обычно жесткость шпиндельного узла значительно больше жесткости суппорта. При патронных работах жесткость передней бабки станка в целом ниже, чем в центрах. Жесткость задней бабки в значительной степени зависит от вылета пиноли, качества центрального гнезда, центра (жесткого, вращающегося).

Характерные примеры отклонения от заданной формы при токарной обработке за счет недостаточной жесткости отдельных элементов металлорежущего станка:

1. Конусность обработанной цилиндрической поверхности детали в сторону передней бабки, при недостаточной жесткости задней бабки.

2. Конусность обработанной цилиндрической поверхности детали в сторону задней бабки при недостаточной жесткости передней бабки.

3. Вогнутость обработанной цилиндрической поверхности детали из-за недостаточной жесткости передней и задней бабок.

Расчет жесткости можно производить, используя формулы теории упругости, сопротивления материалов и контактной жесткости. Жесткость во многом определяется деформациями стыковых поверхностей, качество которых определяется многими случайными факторами, что делает невозможным использование расчётно-аналитических методов. К тому же сама технологическая система является нелинейной, что затрудняет определение упругих перемещений. Жесткость системы в настоящее время определяется только экспериментальным путем. Известно два способа определения жесткости: статический и про-

изводственный. Статический метод определения жесткости станков применяется давно и в настоящее время хорошо известен. Сущность статического способа заключается в определении деформаций неработающего станка при приложении к его узлам определенных нагрузок.

Этот метод имеет то преимущество, что он может быть использован непосредственно в процессе изготовления станка для получения необходимых характеристик жесткости того или иного узла и последующего увеличения жесткости недопустимо слабых узлов.

К недостаткам этого метода надо отнести то, что результаты определения жесткости могут значительно отличаться от истинных значений, так как здесь исключаются влияния целого ряда факторов, имеющих место только при резании.

Производственные методы основаны на определении жесткости в процессе резания, при этом используются образцы с неравномерным припуском: ступенчатые, конические, эксцентричные. При использовании этого метода следует применять заготовки и инструменты повышенной жесткости, исключая влияние их отжата.

Рассмотрим производственный метод определения жесткости токарного станка. При обработке на металлорежущих станках технологическая система подвергается упругим деформациям под действием сил, приложенных к ее звеньям. Это приводит к изменению настроенного положения между деталью и режущим инструментом.

Упругие деформации составляющих силы резания технологической системы возникают под действием всех составляющих силы резания. Но формула жесткости учитывает влияние только составляющей  $P_y$ . Это объясняется тем, что наибольшее влияние на изменение настроенного положения оказывает составляющая силы резания  $P_y$ , направленная перпендикулярно к обрабатываемой поверхности.  $P_y$  влияет на точность размера (например, диаметра) прямо, непосредственно, в то время как деформация под действием других составляющих незначительна. Под воздействием силы резания  $P_y$  элементы технологической системы смещаются из исходного (ненагруженного) состояния. Возникающие при этом силы упругости стремятся вернуть систему в исходное состояние. Смещение (отжатие) элемента технологической системы в направлении выдерживаемого размера и сила упругости находятся в определенном соответствии.

Итак, жесткость  $j$  определяют как отношение составляющей силы резания  $P_y$ , направленной по нормали к обработанной поверхности, к смещению  $y$  в том же направлении:

$$j = \frac{P_y}{y}.$$

В технологических расчетах удобно параметром податливости  $\omega$ , определяемым как отжатие, вызываемое силой, равной единице, то есть податливость обратна жесткости:

$$\omega = \frac{y}{P_y}.$$

Рассмотрим производственный метод определения жёсткости токарного станка с использованием заготовки с тремя короткими ступенчатыми участками.

Жесткость заготовка и резца должны значительно превышать жесткости станка. В этом случае жесткость технологической системы сводится к жесткости станка. На заготовке обрабатываются три коротких ступенчатых участка: у передней бабки, у задней бабки и посередине. При обточке каждого участка снимается слой с глубиной резания  $t_1$  и  $t_2$  (рис. 1.1). Остальные условия обработки (подача, скорость резания и режущий инструмент) остаются неизменными. В процессе обточки ступенчатой заготовки ввиду различной глубины резания имеют место различные силы резания, что в свою очередь приводит к различным отжатиям. Это формирует на обработанной поверхности уступ.

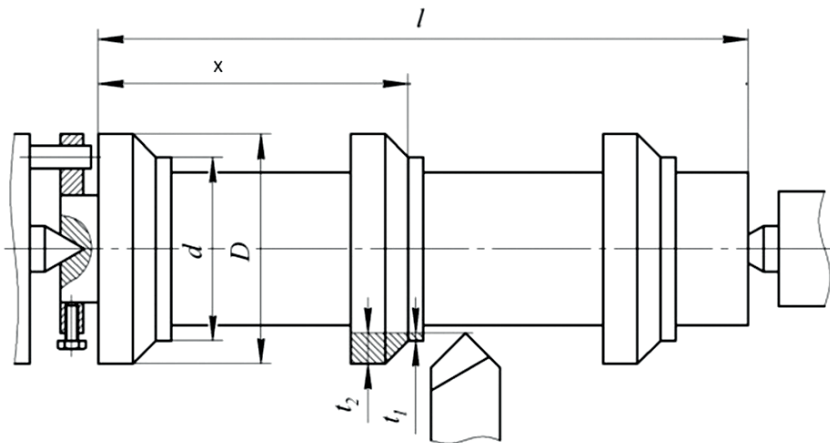


Рис. 1.1. Заготовка и ее установка на станке



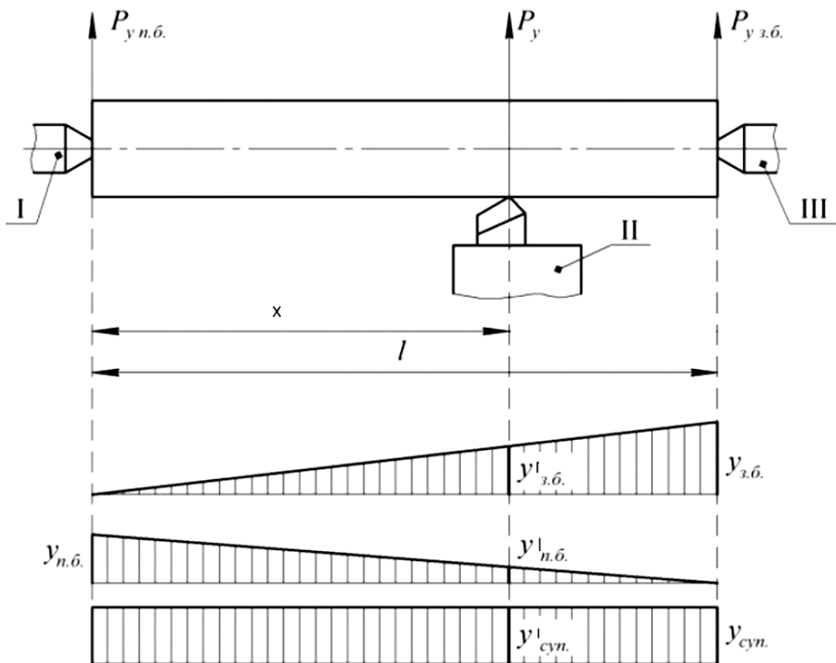


Рис. 1.2. Схема нагрузки и упругих перемещений узлов токарного станка при обработке вала в центрах: I – передняя бабка, II – суппорт, III – задняя бабка;  $P_{y н.б.}$ ,  $P_{y з.б.}$  – силы, возникающие в передней и задней бабках от радиальной составляющей силы резания  $P_y$

Рассмотрим общую схему нагрузки и упругих перемещений узлов токарного станка при обработке вала в центрах (рис. 1.2). Из приведенной схемы видно, что при изменении координаты зоны резания, т. е. при перемещении точки приложения нагрузки по длине обрабатываемой детали, изменяется величина суммарного перемещения узлов станка, следовательно, и величина суммарной податливости и жесткости станка.

Деформации отдельных элементов станка, приведённые к точке, суммируются.

$$y_{суп} = y_{н.б.}^I + y_{з.б.}^I + y_{суп.}^I \quad (1.1)$$

Выразим это выражение через  $P_y$ ,  $j_{н.б.}$ ,  $j_{з.б.}$  и геометрические параметры.

Из рис. 1.2 следует:

$$y_{n.б.}^{\downarrow} = y_{n.б.} \frac{l-x}{l} \quad (1.2), \quad y_{з.б.}^{\downarrow} = y_{з.б.} \frac{x}{l}. \quad (1.3)$$

Справедливо:

$$y_{n.б.} = \frac{P_{yn.б.}}{j_{n.б.}} \quad (1.4)$$

$$y_{з.б.} = \frac{P_{yz.б.}}{j_{з.б.}} \quad (1.5)$$

Уравнения моментов относительно задней и передней бабок дают соответственно:

$$P_{yn.б.} = P_y \frac{l-x}{l}. \quad (1.6)$$

$$P_{yz.б.} = P_y \frac{x}{l}. \quad (1.7)$$

Подставляем (1.6) в (1.4) далее в (1.2), (1.7) в (1.5) далее в (1.3). Получаем, соответственно:

$$y_{n.б.}^{\downarrow} = \frac{P_y}{j_{n.б.}} \left( \frac{l-x}{x} \right)^2, \quad y_{з.б.}^{\downarrow} = \frac{P_y}{j_{з.б.}} \left( \frac{x}{l} \right)^2,$$

вместе с тем для суппорта имеем:

$$y_{суп.} = \frac{P_y}{j_{суп.}}$$

Тогда, окончательно, получаем уравнение деформаций:

$$y_{cm} = \frac{P_y}{j_{n.б.}} \left( \frac{l-x}{l} \right)^2 + \frac{P_y}{j_{з.б.}} \left( \frac{x}{l} \right)^2 + \frac{P_y}{j_{суп.}}$$

Сократив на  $P_y$ , получаем уравнение жёсткости:

$$\frac{1}{j_{см.}} = \frac{1}{j_{н.б.}} \left( \frac{l-x}{l} \right)^2 + \frac{1}{j_{з.б.}} \left( \frac{1}{l} \right)^2 + \frac{1}{j_{суп.}}$$

Уравнение податливости имеет вид:

$$\omega_{см.} = \omega_{н.б.} \left( \frac{l-x}{l} \right)^2 + \omega_{з.б.} \left( \frac{x}{l} \right)^2 + \omega_{суп.}$$

При положении суппорта у передней бабки, у задней бабки, на расстоянии «х» имеем следующее:

$$\omega_{см.н.б.} = \omega_{н.б.} + \omega_{суп.}$$

$$\omega_{см.з.б.} = \omega_{з.б.} + \omega_{суп.}$$

$$\omega_{см.х} = \omega_{н.б.} \left( \frac{l-x}{l} \right)^2 + \omega_{з.б.} \left( \frac{x}{l} \right)^2 + \omega_{суп.}$$

$\omega_{см.н.б.}$ ,  $\omega_{см.з.б.}$ ,  $\omega_{см.х}$  определяются экспериментально. Для удобства расчётов примем:  $\omega_{см.н.б.} = a$ ,  $\omega_{см.з.б.} = b$ ,  $\omega_{см.х} = c$ , тогда

$$a = \omega_{н.б.} + \omega_{суп.} \quad (1.8)$$

$$b = \omega_{з.б.} + \omega_{суп.} \quad (1.9)$$

$$c = \omega_{н.б.} \left( \frac{l-x}{l} \right)^2 + \omega_{з.б.} \left( \frac{x}{l} \right)^2 + \omega_{суп.} \quad (1.10)$$

Будем решать систему уравнений (8,9,10) путём исключения  $\omega_{суп.}$  и далее выражая  $\omega_{з.б.}$  через  $\omega_{н.б.}$ . Вычитаем уравнение (9) из (8), получаем:

$$\omega_{н.б.} = \omega_{з.б.} - a + b \quad (1.11)$$

Далее из (9) вычитаем (8), получаем:

$$b - c = \omega_{з.б.} \left[ 1 - \left( \frac{x}{l} \right)^2 \right] - \omega_{н.б.} \left( \frac{l-x}{l} \right)^2 \quad (1.12)$$

В (12) подставляем (11) и после преобразований получаем:

$$\omega_{з.б.} \frac{2x}{l} = b - c + (b + a) \frac{(l-x)^2}{l^2}$$

Из этого выражения определяем  $\omega_{з.б.}$ , из (1.11) определяем  $\omega_{н.б.}$ , из (1.8) определяем  $\omega_{сзн.}$ .

Погрешность заготовки равна:  $\Delta_{з.з.} = \frac{D-d}{2} = t_2 - t_1$ .

В ходе обработки возникает сила резания, которая определяется по следующей формуле:

$$P_y = \lambda \cdot P_z = \lambda \cdot C_{P_z} \cdot t^{x_{P_z}} \cdot S^{y_{P_z}},$$

где  $\lambda = P_y / P_z$ ;  $t$  – глубина резания;  $S$  – подача;  $C_{P_z}$  – коэффициент, зависящий от материала заготовки и геометрии реза;  $x_{P_z}$ ,  $y_{P_z}$  – показатели степени.

При обработки стали, согласно Челюсткину А.Н.:  $x_{P_z} = 1,0$ ,  $y_{P_z} = 0,75$ , тогда:

$$P_y = \lambda \cdot C \cdot t \cdot S^{0,75} - \text{формула Челюсткина А. Н.}$$

Из этой формулы следует, что при глубине резания  $t_1$  возникает сила резания  $P_{y_1}$ , соответственно, при  $t_2$  возникает  $P_{y_2}$ .

Так как  $t_1 < t_2$ , то  $P_{y_1} < P_{y_2}$ . Вместе с тем, чем меньше сила резания, тем меньше отжатие  $U$ . Ввиду различных величин отжатий на детали после обработки формируется погрешность. При этом погрешность исходной заготовки копируется на обработанной детали в виде одноимённой погрешности, то есть, ступенька в ступеньки, конусность в виде конусности, эксцентричность в виде эксцентричности. Погрешность детали будет равна:

$$\Delta_{дет.} = \frac{D_1 - d_1}{2} = y_2 - y_1,$$

где  $D_1, d_1$  размеры деталей в результате обработки;

$\varepsilon = \frac{\Delta_{заг.}}{\Delta_{дет.}}$  – уточнение. Уточнение показывает во сколько раз деталь стала точнее

заготовки.

Определим жёсткость станка следующим образом:

$$\Delta_{дет.} = y_2 - y_1 = \frac{1}{j_{cm.}} (P_{y_2} - P_{y_1}).$$

$$\text{Тогда } j_{cm.} = \frac{P_{y_2} - P_{y_1}}{\Delta_{дет.}} = \frac{\lambda \cdot C_p \cdot s^{0.75} \cdot (t_2 - t_1)}{\Delta_{дет.}} = \lambda \cdot C_p \cdot s^{0.75} \cdot \frac{\Delta_{заг.}}{\Delta_{дет.}} = \lambda \cdot C_p \cdot s^{0.75} \cdot \varepsilon.$$

$$\text{Окончательно: } j_{cm.} = \varepsilon \cdot \lambda \cdot C_p \cdot s^{0.75}.$$

Таким образом, определение жёсткости токарного станка производственным методом практически сводится к измерению заготовки до и после обработки.

Рассмотрим обработку в несколько проходов.

$$\text{После первого прохода имеем: } \Delta_{1дет.} = \frac{\Delta_{заг.}}{\varepsilon_1}.$$

$$\text{После второго прохода имеем: } \Delta_{2дет.} = \frac{\Delta_{1дет.}}{\varepsilon_2} = \frac{\Delta_{заг.}}{\varepsilon_1 \varepsilon_2}.$$

$$\text{После } i\text{-го прохода имеем: } \Delta_{iдет.} = \frac{\Delta_{заг.}}{\varepsilon_1 \varepsilon_2 \dots \varepsilon_i}.$$

Последнее выражение показывает, что при многопроходной обработке точность детали повышается в геометрической прогрессии. Поэтому процесс обработки подразделяется на этапы: черновая, чистовая, отделочная.

Для выявления и анализа закономерностей рассеяния (распределения) размеров и, на его основе, для анализа точности партии деталей в машиностроительном производстве в основном используется статистический метод [31].

*Статистический* метод анализа точности партии деталей рассмотрим на примере. Методом автоматического получения размера на предварительно настроенном станке изготовлена партия деталей (валики)  $N = 50$  штук. Размеры готовых деталей разбиваем на интервалы и подсчитываем количество деталей, размеры которых лежат в каждом интервале. Результаты представлены в табл. 1.1.

Здесь  $m/N$  есть вероятность. При статистическом анализе использование вероятностных характеристик позволяет с помощью малой выборки определять

характеристики генеральной совокупности. Далее экспериментальные результаты представляем в виде графика (рис. 1.3).

Таблица 1.1

Интервал, мм		Частота $f$	Частость $f/N$
свыше	до		
19,90	19,92	2	0,02
19,92	19,94	4	0,04
19,94	19,96	10	0,10
19,96	19,98	22	0,22
19,98	20,00	26	0,26
20,00	20,02	20	0,2
20,02	20,04	8	0,08
20,04	20,06	4	0,04
20,06	20,08	2	0,02
20,08	20,10	2	0,02
		$\sum f = 100$	$\sum f/N = 1$

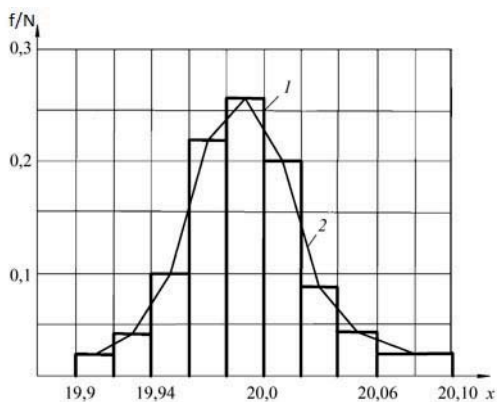


Рис. 1.3. Распределение размеров партии деталей:  
1 – гистограмма; 2 – полигон распределения

Имеем ступенчатый график, называемый гистограмма (греч. гисто – столб). Ломаная линия – полигон распределения. Данный график отражает вероятностное распределение *действительных* размеров. Размеры (числа) на этом графике являются *дискретными* и носят случайный характер. Эмпирическое распределение случайной величины есть выборка из генеральной совокупности, подчиняющаеяся какому либо теоретическому закону распреде-

ления. Выборкой называется часть членов совокупности, отобранных из неё для получения сведений о всей совокупности. На основании закона больших чисел можно считать, что распределение выборки будет отражать характер распределения (в данном случае, точностные параметры) генеральной совокупности.

Закон больших чисел есть обобщенное название нескольких теорем, из которых следует, что при неограниченном увеличении числа испытаний средние величины стремятся к некоторым постоянным. То есть, среднее значение многих независимых случайных величин сходится к некоторому значению при увеличении числа этих величин. В частности, теорема Чебышева говорит, что отклонение средних значений от математического ожидания становится сколь угодно малым с вероятностью, близкой к единице, если независимых случайных величин  $N$  достаточно велико. Другими словами, вероятность любого отклонения средних значений от математического ожидания сколь угодно мала с ростом  $N$ . На теореме Чебышева основан широко применяемый в статистике выборочный метод, суть которого состоит в том, что по сравнительно небольшой случайной выборке судят обо всей совокупности (генеральной совокупности) исследуемых объектов.

Далее дискретный экспериментальный график (рис. 1.3) заменяем ближайшей теоретической кривой, которая математически описана и является непрерывной.

В машиностроении распределение (рассеивание) размеров партии деталей подчиняется следующим законам распределения непрерывных случайных величин: закон нормального распределения (закон Гаусса), закон равнобедренного треугольника (закон Симпсона), закон эксцентриситета (закон Релея), закон равной вероятности, композиционные законы. Теоретические законы распределения непрерывных случайных величин непрерывного типа задаются в дифференциальной и интегральной формах. Дифференциальный закон распределения есть закон распределения плотности вероятности:

$$\varphi(x) = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta P}{\Delta x} = \frac{dP}{dx}.$$

Здесь  $P$  – вероятность;  $x$  – текущее значение случайной величины  $X$ .

Интегральный закон распределения, или просто функция распределения  $F(x)$ , есть вероятность того, что случайная величина  $X$  примет значение, меньшее или равное заданному « $x$ »:

$$F(x) = P(X \leq x).$$

$F(x)$  связана с  $\varphi(x)$  следующим образом:

$$F(x) = \int_{-\infty}^x \varphi(x) dx = \int_{-\infty}^x \frac{dp}{dx} dx = P(-\infty \leq X \leq x).$$

Вероятность появления случайной величины  $X$  в интервале  $x_1 \leq X \leq x_2$ :  $P(x_1 \leq X \leq x_2) = F(x_2) - F(x_1)$ .

Отсюда следует, что *вероятность любого отдельного значения непрерывной случайной величины равна нулю. В равной степени это справедливо и для дискретных случайных величин. Другими словами, вероятность любого события в точке равна нулю.*

Как говорил немецкий математик Давид Гильберт, «... каждая точка состоит из бесконечного количества других точек, находящихся на бесконечно малом расстоянии». Поэтому вероятность того, что действительный размер совпадет с заданным, равна нулю. Отсюда также следует, что вероятность может быть определена только на каком-то интервале, что и было сделано на гистограмме. При этом, оперировали счетным числом измерений, поэтому вероятность на интервале определялась непосредственно через  $f/N = P$ . Для непрерывной случайной величины вся числовая ось заполнена. Тогда для каждого интервала  $f = \infty$ ;  $N = \infty$ . Отношение  $f/N$  есть неопределенность. Одним из методов раскрытия неопределенности является определение предела, что и поясняет использование *плотности вероятности* для непрерывной случайной величины.

В точке вероятность равна нулю, плотность вероятности в точке не равна нулю. Это и позволяет путем интегрирования плотности вероятности определить вероятность на интервале. Таким же образом при движении определяется мгновенная скорость, т. е. скорость в точке. В точке пройденный путь равен нулю, однако скорость существует. Скорость движения есть плотность пути.

Для дальнейшего анализа точности партии деталей будем использовать закон нормального распределения (закон Гаусса), по которому распределяется большинство размеров в машиностроении. К тому же этот закон является предельным, т. е. другие законы, по мере компонования (увеличения количества деталей в партии), переходят в закон Гаусса. Закон нормального распределения находит широкое применение в различных отраслях техники. Этому закону подчиняются непрерывные случайные величины: размеры деталей, обработанные на металлорежущих станках способом автоматического получения размера с точностью 8 квалитета и грубее, размеры заготовок после штамповки, ошибки измерения и во многих процессах в природе и технике.



Закон носит название нормального. Этот термин основан на идее универсальности закона Гаусса и противопоставлении его всем другим распределениям.

Распределение по закону Гаусса впервые было подробно исследовано в конце XVIII и начале XIX века Гауссом применительно к ошибкам наблюдений и Лапласом при рассмотрении предельных распределений при повторении испытаний. Среди ряда работ других учёных важное значение имеет предельная теорема Ляпунова о распределении суммы независимых случайных слагаемых. Теорема, доказанная Ляпуновым, имеет настолько важное значение для теории вероятностей и её применений, что получила название центральной теоремы теории вероятностей. Она объясняет, почему во многих случаях разные случайные величины с большой точностью следуют закону нормального распределения.

Опуская строгую математическую формулировку теоремы Ляпунова и её доказательства ввиду их сложностей, ограничимся описанием следствия их этой теоремы, которая заключается в следующем.

Если случайная величина  $X$  представляет сумму большого числа взаимно независимых случайных величин  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_N$ , влияние которых на сумму ничтожно мало, то независимо от того, каким законам распределения подчиняются слагаемые  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_N$ , сама величина  $X$  будет иметь распределение вероятностей близкое к нормальному, и тем точнее, чем больше число слагаемых.

Из теоремы Ляпунова можно сделать вывод, имеющий большое практическое значение о том, что если изучаемая величина является суммой большого числа независимых случайных слагаемых, даже если они неизвестны, то можно заранее считать, что наша величина имеет нормальное распределение.

Теорема Ляпунова даёт теоретическое объяснение тому факту, что при устойчивом процессе обработки деталей на настроенных станках и при отсутствии изменяющихся во времени систематических погрешностей действительные размеры деталей часто подчиняются закону нормального распределения так как результирующая погрешность обработки представляет собой сумму большого числа погрешностей, зависящих от станка, приспособления, инструмента и заготовки.

Дифференциальная форма закона нормального распределения имеет следующий вид:

$$\varphi(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}. \quad (1.13)$$