

Высшее профессиональное образование

---

БАКАЛАВРИАТ

А. Г. СХИРТЛАДЗЕ, А. В. СКВОРЦОВ

# ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОИЗВОДСТВА

УЧЕБНИК

*Допущено*

*Учебно-методическим объединением вузов*

*по образованию в области автоматизированного машиностроения*

*в качестве учебника для студентов высших учебных заведений,*

*обучающихся по направлению подготовки «Автоматизация*

*технологических процессов и производств»*



Москва

Издательский центр «Академия»

2011

УДК 621(075.8)  
ББК 34.5я73  
С427

**Рецензенты:**

профессор кафедры «Технология машиностроения» МГТУ «Станкин», д-р техн. наук *В. А. Тимирязев*;  
зав. секцией технологии машиностроения кафедры «Технология машиностроения и материаловедения» Московского государственного университета инженерной экологии, канд. техн. наук, доц. *В. И. Колчков*

**Схиртладзе А. Г.**

**С427** Технологические процессы автоматизированного производства : учебник для студ. учреждений высш. проф. образования / А. Г. Схиртладзе, А. В. Скворцов. — М. : Издательский центр «Академия», 2011. — 400 с. — (Сер. Бакалавриат).

ISBN 978-5-7695-6980-7

Учебник создан в соответствии с Федеральным государственным образовательным стандартом по направлению подготовки 220700 «Автоматизация технологических процессов и производств» (квалификация «бакалавр»).

Даны сведения о технологических процессах в машиностроении, методах автоматизированного технологического проектирования, структурировании технологических маршрутов, операций и переходов, выполнении технологических расчетов, анализе погрешностей и методах обеспечения точности при механической обработке и сборке. Сопоставлены структуры технологических производств отрасли. Приведены комплексные сведения о методах обеспечения качества и точности поверхностей деталей машин. Представлен анализ технологических процессов и оборудования для их реализации как объектов автоматизации и управления. Рассмотрены методы и процедура компьютерного проектирования единичных, групповых, типовых и модульных технологических процессов, теория статических и динамических свойств технологических объектов. Уделено внимание компьютерному проектированию технологических процессов с использованием CALS/ИПИ-технологий. Рассмотрены технико-экономические критерии качества и цели управления, математические модели производств с точки зрения процессов управления, последовательность интеграции производственных систем. Описаны функции современных MRP- и ERP-систем управления производственными процессами.

Для студентов учреждений высшего профессионального образования.

УДК 621(075.8)  
ББК 34.5я73

*Оригинал-макет данного издания является собственностью  
Издательского центра «Академия», и его воспроизведение любым  
способом без согласия правообладателя запрещается*

© Схиртладзе А. Г., Скворцов А. В., 2011

© Образовательно-издательский центр «Академия», 2011

© Оформление. Издательский центр «Академия», 2011

ISBN 978-5-7695-6980-7

## СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

---

АЛ	—	автоматическая линия
АРМТ	—	автоматизированное рабочее место технолога
АСУ	—	автоматизированная система управления
АСУП	—	автоматизированная система управления производством
ВП	—	виртуальное предприятие
ГПМ	—	гибкий производственный модуль
ГПС	—	гибкая производственная система
ЕИП	—	единое информационное пространство
ЕСКД	—	единая система конструкторской документации
ЕСТД	—	единая система технологической документации
ЖЦ	—	жизненный цикл
ИКТ	—	информационные компьютерные технологии
ИСО	—	Международная организация по стандартизации
ИТБ	—	искусственная технологическая база
КИМ	—	координатно-измерительная машина
КТМ	—	конструктивно-технологический модуль
КТЭ	—	конструктивно-технологический элемент
КЭ	—	карта эскизов
ОС	—	операционная система
ПА	—	полуавтомат
ПК	—	персональный компьютер
ПП	—	производственный процесс
ППД	—	поверхностное пластическое деформирование
ПР	—	промышленный робот
РМАС	—	рабочее место автоматизированной сборки
РПС	—	распределенная производственная среда
САПР	—	система автоматизированного проектирования
СОЖ	—	смазочно-охлаждающая жидкость
СОТС	—	смазочно-охлаждающая технологическая среда
СТО	—	средства технологического оснащения
СУ	—	система управления
СЧПУ	—	система числового программного управления
ТВЧ	—	токи высокой частоты
ТЗ	—	техническое задание
ТМ	—	технологический модуль

ТМО	—	термомеханическая обработка
ТМС	—	технология машиностроения
ТО	—	термическая обработка
ТП	—	технологический процесс
ТС	—	технологическая система
УТМ	—	унифицированный технологический модуль
ХТО	—	химико-термическая обработка
ЧПУ	—	числовое программное управление
ЭВМ	—	электронно-вычислительная машина
ЭСИ	—	электронная структура изделия

Машиностроение во многом определяет общий технический прогресс в экономике страны. Оно составляет основу ее промышленного потенциала. Различные отрасли машиностроения обеспечивают производство транспортных средств (корабли, суда, локомотивы для железных дорог, автомобили, тракторы), технологических машин разного назначения и оборудования для энергетики.

Машиностроительная продукция, определяющая материальные основы жизни человека и общества в качественном и количественном отношении, создается на промышленных предприятиях в процессе производства. Предприятия выпускают машины и сопутствующие элементы, выполняют работы по их поставке, монтажу, испытаниям и вводу в эксплуатацию, осуществляют гарантийное и техническое обслуживание, ремонт и модернизацию изделий. Машиностроительное производство представляет собой совокупность материальных средств (станки, оборудование и инфраструктура) предприятия любой принятой формы собственности и организационно-правовой формы, а также условий труда для изготовления продукции.

Непосредственно выпуск продукции машиностроения осуществляется производственной системой предприятия, являющейся совокупностью установленного оборудования, а также методов обеспечения его функционирования и управления. Изделия изготавливаются в ходе ПП, представляющего собой совокупность действий людей и функционирования оборудования с использованием необходимых технологий.

*Технология* (от греч. technē — искусство, умение, мастерство и logos — учение) согласно классическому определению есть совокупность методов обработки, изготовления, контроля и изменения состояния, свойств и формы заготовок, сырья, материалов или полуфабрикатов, осуществляемых в процессе производства продукции. В настоящее время термин «технология» означает более широкое понятие, а именно совокупность методов и средств для совершения каких-либо целенаправленных действий, полезных для человека. Например, широко распространено такое понятие, как ИКТ, охватывающее методы и средства получения, обработки,

хранения и передачи информации. В современном производстве ИКТ являются частью общемашиностроительных технологий.

*Технология машиностроения* — это широкий раздел науки, содержащий обобщенное множество производственных технологий, относящихся к процессам изготовления продукции машиностроения в различных отраслях промышленности: станкостроительной, инструментальной, автомобильной, авиационной, приборостроительной и др. Задача ТМС как науки — выявление физических, химических, механических и других закономерностей, действующих в процессе производства, с целью их использования для нахождения и реализации на практике наиболее эффективных и экономичных методов изготовления машиностроительной продукции.

Развитие научных принципов массового и серийного производства наряду с общим прогрессом науки и техники позволило на практике значительно снизить себестоимость продукции и повысить производительность труда. Задача выпуска разнообразных изделий в чрезвычайно большом количестве требует оптимизации ТП, основывающихся на передовых научно-технических достижениях. Технология машиностроения является комплексной инженерно-научной дисциплиной и сочетает в себе особенности прикладной науки и передовых направлений физико-технических исследований. Задача другого рода состоит в том, чтобы внедрить в практику новейшие научные открытия, которые обеспечат создание новых производств и высоких технологий, качественное изменение жизни и повышение благосостояния людей.

В современных условиях получили развитие методы изготовления продукции машиностроения, связанные с необходимостью использования тонких физико-механических и квантовых эффектов на субатомном и субмолекулярном уровнях. Размеры многих элементов изделий составляют несколько нанометров ( $1 \text{ нм} = 10^{-9} \text{ м}$ ). Производство таких элементов и обеспечение нового качественного уровня изделий входят в круг задач нанотехнологии и требуют создания ультрапрецизионного технологического оборудования. Применение высоких технологий, включая ИКТ, позволяет избежать рутинных непроизводительных затрат времени и труда, во много раз ускорить темпы внедрения новой техники, передавать конструкторские чертежи и технологическую документацию практически мгновенно в электронной форме.

Значительную роль в становлении отечественной технологической науки сыграли труды ряда известных ученых: Н. А. Бородачева, Ф. С. Демьянюка, А. П. Соколовского, В. М. Кована, Э. А. Сателя, Б. С. Балакшина, В. С. Корсакова, М. Е. Егорова, А. М. Дальского, И. М. Колесова, А. А. Маталина, А. В. Подзея, Ю. М. Соломенцева, А. Б. Яхина, П. И. Ящерицына и др. Впервые получили развитие

методы проектирования типовых (А. П. Соколовский), групповых (С. П. Митрофанов), модульных (Б. М. Базров) и обобщенных маршрутных (Н. М. Капустин и др.) ТП. В области создания систем автоматизации машиностроительных производств, адаптивного управления станками и автоматизированного проектирования широко известны труды Л. Н. Кошкина, Б. С. Балакшина, Г. К. Горанского, Л. В. Худобина, В. Д. Цветкова и др.

В настоящее время наиболее интенсивно развиваются ИКТ на основе ПК, локальных и глобальных компьютерных сетей, самой крупной из которых является Интернет. Проектирование конструкций и ТП осуществляется на основе компьютерной графики и твердотельного 3D-моделирования, что обеспечивает значительное повышение качества технической документации и производительности труда специалистов.

Интернет-технологии позволяют рассматривать производственную среду значительно шире с включением в нее большой группы родственных и смежных предприятий. Поскольку информационный обмен в Интернете происходит практически в реальном масштабе времени, при организации производства новых изделий можно использовать РПС. Тогда множество связей, установленных с конкретными предприятиями при помощи ИКТ в целях изготовления конкретного вида продукции машиностроения, принято считать ВП. Такое предприятие основано на принципах и стимулах ведения совместного электронного бизнеса в мировом или региональном рыночном пространстве. Подавляющее число операций в ВП осуществляется с применением компьютерных баз знаний и баз данных. При автоматизации производства и проектирования рассматриваются математические, алгоритмические и конструкторские принципы построения технических средств автоматизации, создания ПР и САПР на основе компьютерной техники.

# ОБЩИЕ ПОНЯТИЯ О ПРОИЗВОДСТВЕ И ТЕХНОЛОГИИ МАШИНОСТРОЕНИЯ

## 1.1. Основные понятия и определения

Продукцией машиностроительного производства является *изделие*, которое согласно ЕСКД (ГОСТ 2.101 — 68\*) представляет собой предмет или набор предметов, подлежащих изготовлению на предприятии. Изделия могут быть следующих видов (рис. 1.1): детали, сборочные единицы, комплексы и комплекты.

*Деталь* — это изделие, изготовленное из одного куска однородного материала без применения сборочных операций. На деталь может быть нанесено покрытие. Возможно также изготовление детали с использованием местной сварки, пайки и т. п. (например, коробку вырезают из одного листа металла и сваривают по углам). Для таких изделий выпускают *деталировочные чертежи*.

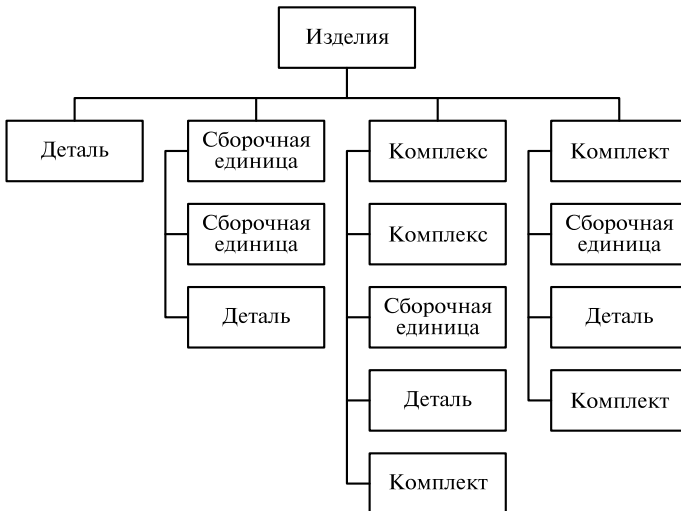


Рис. 1.1. Виды и структуры изделий согласно ГОСТ 2.101—68\*



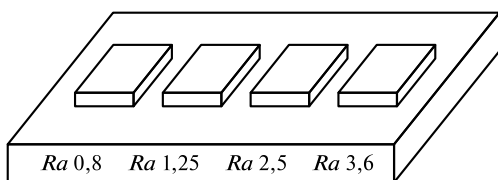


Рис. 1.2. Комплект образцов шероховатости

К *сборочной единице* относится изделие или его составная часть, которая изготовлена с применением сборочных операций сочленения, свинчивания, сварки, пайки, склеивания, клепки, сшивки, развальцовки, запрессовки, закладки, укладки и т. п. Основными документами для сборочных единиц являются *сборочные чертежи* и *спецификации*, которые полностью определяют состав подобных изделий.

*Комплекс* представляет собой изделие, предназначенное для выполнения строго определенных взаимосвязанных функций. Такое изделие не соединяется на предприятии-изготовителе методами сборки, а монтируется на месте его эксплуатации. Это сложное многофункциональное изделие, окончательная сборка или монтаж которого при изготовлении невозможны или нецелесообразны. К комплексам относятся большинство металлорежущих станков, буровые и ракетные установки, ПК, каждый системный блок которых снабжен периферийным оборудованием: монитором, клавиатурой, кабелями и т. п. Для комплексов выпускают *чертежи общего вида*, *монтажные чертежи*, *схемы* и *спецификации*.

*Комплект* — это изделие, содержащее набор элементов, не соединенных друг с другом методами сборки. Комплекты предназначены для выполнения функций вспомогательного характера (комплекты запасных частей, инструментов, приспособлений, измерительных приборов, оснастки и т. п.). Для комплектов целесообразен выпуск *чертежей общего вида* и *спецификаций*. Так, на рис. 1.2 приведен комплект образцов шероховатости для контроля обработанных поверхностей.

Ускорение производства изделий и необходимость повышения конкурентоспособности предприятия предполагают осуществление текущего контроля за всеми процессами на протяжении ЖЦ продукции. Понятие ЖЦ охватывает все стадии информационного представления продукции от выявления потребности в ней и анализа научно-технических возможностей выпуска продукции наивысшего на данный момент качества до прекращения ее производства, вывода из эксплуатации и утилизации по окончании срока службы.

Таким образом, рыночная деятельность в сфере создания, производства и эксплуатации высокоинтеллектуальной материальной и иной продукции предполагает значительную степень автоматизации процессов получения и переработки чрезвычайно большого объема сопутствующей информации. Внедрение ИКТ на промышленных предприятиях позволяет им получать полную информацию о продукции, оптимизировать ее параметры и работать на рынке в условиях конкуренции.

*Жизненный цикл* продукции по определению (ГОСТ Р ИСО 9004—2001) есть совокупность процессов, выполняемых в течение реального времени от момента выявления потребностей общества в определенной продукции до момента удовлетворения этих потребностей и утилизации продукции. В зависимости от степени сложности ЖЦ могут включать в себя такие процессы, как предпроектные исследования, разработка технического задания, проектирование и конструирование, технологическая подготовка производства, изготовление и испытания опытных образцов, производство изделий, поставка их потребителям, ввод в действие и прекращение эксплуатации.

*Технология машиностроения* в практическом понимании — это наука о производстве в заданные сроки машиностроительной продукции необходимого качества в установленном программой выпуска количестве при обеспечении минимальной себестоимости, максимальной в данных условиях производительности и безопасности труда, наименьшем расходе сырья, материалов, полуфабрикатов и энергии, а также приемлемом воздействии на окружающую среду (рис. 1.3). В соответствии с данным определением задачи ТМС взаимосвязаны с техническими, экономическими, управленческими, экологическими, организационными, социальными, психологическими и другими аспектами производственной деятельности, основой которой является труд людей.

При осуществлении ПП необходимы предметы труда, рабочие места и СТО.

*Предмет* труда, или *объект производства*, представляет собой материальный объект, подвергаемый обработке, сборке и другим воздействиям в течение всего ПП до получения конечной продукции (изделия).

*Рабочее место* — это элементарная функциональная часть пространства цеха или участка, на которой размещены исполнители работ, единица технологического оборудования, оснастка и предметы труда.

*Средства технологического оснащения* представляют собой совокупность технологического и вспомогательного оборудования, оснастки и материалов, применяемых в производстве для



Рис. 1.3. Задачи технологии машиностроения

изменения формы и параметров предмета труда. Каждое рабочее место должно быть снабжено СТО.

*Технологическое оборудование* служит для осуществления целенаправленных действий по изменению состояния и параметров предмета труда. К технологическому оборудованию относятся станки, прессы, литейные машины, сборочные станды, испытательные установки и т. п.

*Технологическая оснастка* является средством, дополняющим технологическое оборудование для более качественного и производительного выполнения определенной части ТП. К оснастке относятся инструменты, приспособления, прессовые и литейные формы, средства контроля и др.

*Заготовка* представляет собой предмет труда, из которого посредством изменения формы, состояния и параметров материала изготавливают деталь или неразъемную сборочную единицу. Обычно заготовки получают резкой проката, штамповкой, ковкой, литьем, сваркой и другими способами.

Структура и содержание ТП полностью определяются конструкторской документацией и главным образом конструкторскими чертежами. Эта документация имеет исключительно важное значение для деятельности специалистов, работающих в производственной сфере.

Эффективное функционирование производства обеспечивается его весьма сложной *технической подготовкой*, которая включает в себя конструкторскую, технологическую и организационно-экономическую подготовку (рис. 1.4).

*Конструкторская* подготовка производства состоит в проектировании и конструировании новых изделий. Она завершается составлением рабочей технической документации (чертежи, схемы, технические описания и условия, паспорта, инструкции по эксплуатации и т. п.).

*Технологическая* подготовка производства представляет собой комплекс взаимосвязанных процессов, обеспечивающих готовность производства к выпуску новых или повторяющихся вновь партий изделий. Такая подготовка заключается в отработке изделий на технологичность, проектировании ТП и создании СТО. К технологической подготовке производства в настоящее время относят разработку программ для систем ЧПУ, соответствующих компьютерных программ, методов обеспечения функционирования производственных и технологических процессов и управления ими, ведение баз данных, разработку и внедрение на предприятии принципиально новых технологий.

*Организационно-экономическая* подготовка производства состоит в обеспечении производства материально-техническими средствами (сырье, заготовки, полуфабрикаты, вспомогательные материалы, энергия), трудовыми, информационными и финансовыми ресурсами, договорными и распорядительными документами. При этом осуществляется календарное планирование, а также организация правильного и ритмичного функционирования производства.

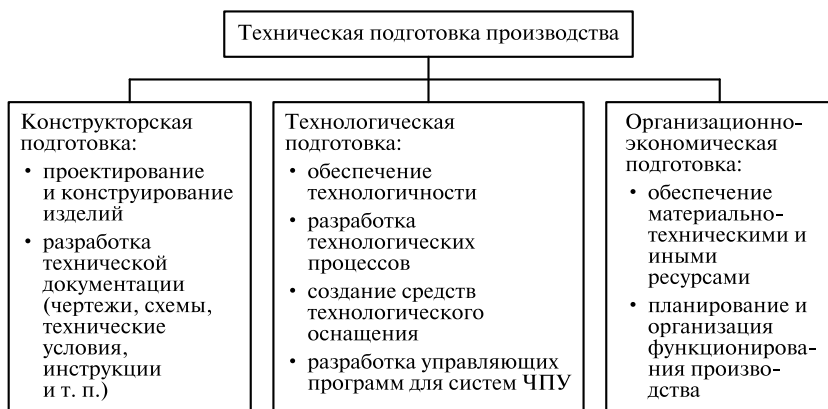


Рис. 1.4. Структура технической подготовки производства

В процессе технической подготовки производства широко используются ИКТ и Интернет. Обучение специалистов в области ТМС проводится с применением современных ПК. Первоначальные навыки владения ИКТ развиваются и дополняются при изучении основных дисциплин технологического профиля.

## 1.2. Сведения о качестве продукции машиностроения

Обеспечение требуемого качества продукции входит в число основных задач ТМС. Качество продукции является комплексной характеристикой ее потребительских свойств, определяющей способность продукции выполнять установленные функции. Под *качеством* согласно ГОСТ Р ИСО 9000—2008 понимают совокупность свойств продукции, способных своевременно удовлетворять определенные потребности заказчика в соответствии с ее назначением. Совокупность свойств продукции характеризуется несколькими группами показателей качества. Это показатели назначения, надежности, технологичности, стандартизации и унификации, а также эксплуатационные, экономические, эргономические, экологические и другие показатели.

Показатели *назначения* определяют наиболее важные функциональные свойства изделий. Например, у станка с ЧПУ к таковым следует отнести применяемые методы обработки, производительность, точность исполнения обрабатываемых поверхностей, максимальные габаритные размеры заготовок и др.

*Эксплуатационные* показатели характеризуют условия окружающей среды, в которой функционируют изделия (диапазоны температур, давлений и влажности, наличие пыли, тумана, ударно-вибрационных воздействий и т. п.).

*Экономические* показатели, такие, как цена, себестоимость, затраты на эксплуатацию и ремонт, во многом определяют конкурентоспособность изделий.

*Эргономические* показатели характеризуют степень соответствия изделия требованиям к системе человек—машина, т. е. удобство конструкции по отношению к антропометрическим и физиологическим данным человека (например, удобство расположения органов управления, применение допустимых для человека усилий и др.).

*Надежность* представляет собой комплексное свойство технического объекта, состоящее в его способности выполнять заданные функции, сохраняя свои характеристики в установленных пределах в течение заданного срока эксплуатации.

Показатели надежности обеспечиваются научно-техническим уровнем конструкторской документации, совершенством технологии изготовления, конструкторской, технологической и производственной дисциплиной. Проводится широкий спектр исследований в области обеспечения надежности с использованием ИКТ.

*Группа показателей надежности* согласно ГОСТ 13377—75 характеризует свойство изделий сохранять во времени работоспособность. К данной группе относятся показатели безотказности, долговечности, ремонтпригодности и сохраняемости.

*Безотказность* представляет собой вероятностное свойство изделия сохранять работоспособность в течение некоторого времени эксплуатации или наработки до отказа, т. е. времени непрерывной работы. Основным показателем безотказности является *вероятность безотказной работы*, задаваемая на определенный период эксплуатации (наработки).

*Долговечность* — свойство изделия сохранять работоспособность с учетом периодов хранения, ремонта и восстановления до наступления предельного состояния, после которого изделие выводится из эксплуатации и утилизируется.

*Ремонтпригодность* — это способность изделия подвергаться ремонту и восстановлению характеристик, по завершении которых оно вновь становится работоспособным. После ремонта изделие направляется в эксплуатацию.

*Сохраняемость* представляет собой свойство изделия сохранять в заданных пределах значения своих параметров, характеризующие его способность выполнять установленные функции до и после хранения и (или) транспортирования к месту эксплуатации.

*Технологичность* изделия, относящаяся к наиболее важным показателям качества, характеризует соответствие конструкции изделия методам и средствам ее изготовления на конкретном предприятии.

Технологичность изделия связана со всеми стадиями производства: получением заготовок, обработкой, сборкой, контролем, испытаниями, ремонтом и восстановлением.

К показателям технологичности относят:

- *общую трудоемкость* —  $T_0$ , которая представляет собой продолжительность изготовления всего изделия, в часах или минутах, производственными рабочими при нормальной интенсивности труда;

- *станкоемкость* — суммарное время, в течение которого станки и другое технологическое оборудование функционируют в целях изготовления всех элементов изделия и его последующей сборки;

- коэффициент использования материала  $K_{н.м}$ , определяемый по формуле  $K_{н.м} = t/M$ , где  $t$  — масса детали;  $M$  — масса заготовки;

- производственный цикл, продолжительность которого представляет собой календарный срок от начала до окончания изготовления изделия;

- конструктивную приемственность изделия  $K_{п.и}$ , равную отношению числа комплектующих элементов  $N_p$ , которые использовались ранее в других изделиях, к общему числу комплектующих элементов в данном изделии  $N_{э.и}$ , а именно  $K_{п.и} = N_p / N_{э.и}$ ;

- технологическую приемственность изделия, характеризующую возможность использования ранее применявшихся методов обработки и сборки при изготовлении данного изделия; соответствующий показатель  $K_{т.п}$  определяется по формуле  $K_{т.п} = T_{о.р} / T_o$ , где  $T_{о.р}$  — суммарная трудоемкость более ранних методов обработки и сборки при изготовлении данного изделия.

В практике машиностроения встречаются и другие показатели технологичности изделия, например коэффициент применения новых СТО (станки, инструменты, приспособления, контрольная оснастка и др.), определяемый как отношение числа ранее использовавшихся СТО к их общему числу, требующемся для изготовления изделия.

Технологичность изделия является важным критерием, определяющим соответствие технических, технологических и организационно-экономических условий для производства изделия возможностям конкретного предприятия. В условиях рынка одним из наиболее значимых показателей технологичности следует считать *время, затрачиваемое на технологическую подготовку производства*.

При создании изделий для их представления применяют также конструктивные, эстетические, патентно-правовые, маркетинговые и другие показатели качества. Они могут быть единичными, групповыми или интегральными (комплексными). *Единичные* показатели качества характеризуют изделие по одному параметру, *групповые* — одновременно по нескольким однородным показателям (группам показателей), например по показателям технологичности, а *интегральные* — по целому ряду (комплексу) показателей, в том числе разнородных. Например, удобство использования машины по назначению может характеризоваться интегральным показателем и оцениваться с помощью внеразмерной системы оценок, в частности в баллах.

Интегральные показатели качества часто вычисляют на основании математической теории экспертных систем. При этом применяют коэффициенты влияния (весомости)  $K_v$  конкретных показателей на значение искомого интегрального показателя.

Так, на интегральный показатель технологичности в наибольшей степени влияет себестоимость изделия. Поэтому при оценке этого показателя коэффициент  $K_b$  показателя себестоимости будет наибольшим по сравнению с коэффициентами влияния прочих показателей.

### **1.3. Анализ назначения технологических машин**

Любое изделие, техническая, управляющая или информационная система создаются для удовлетворения определенных потребностей человека или общества. В частности, технологическая машина, ТМ и ТС предназначены для выполнения процессов машиностроительного производства.

*Технологический модуль* — единица технологического оборудования, предназначенная для выполнения установленных технологических операций. К ТМ можно отнести станок, сборочную установку, контрольно-измерительную машину, испытательный стенд, закалочную печь и др.

*Технологическая система* представляет собой совокупность технологического оборудования и элементов обеспечения ее функционирования, предназначенную для выполнения законченного множества установленных ТП. К ТС относят технологически связанные друг с другом станочные системы, снабженные соответствующими СТО. Технологические системы могут быть автоматизированными (автоматические линии) или неавтоматизированными (поточные линии, участки и отделения станков, цеха и т. п.).

Технологические модули и системы создаются на основе принципов рентабельности, конкурентоспособности, прибыльности при достижении требуемого качества, высокой производительности, безопасности, гибкости и стабильности технологических процессов. Перед началом проектирования ТМ и ТС машиностроительных производств устанавливается область характеристик, которыми они должны обладать с целью получения требуемой эффективности. При проектировании оборудования с ЧПУ необходимо методами эвристического программирования, физико-математического или функционального моделирования установить параметрический комплекс показателей, определяющий назначение (область применения, технико-экономические, технологические и другие свойства) данных изделий.

Так, основой для описания назначения элементов ТС (или ТМ) служат характеристики производимых объектов (заготовок,



деталей, сборочных единиц, комплектов, комплексов), а именно номенклатура, объемы выпуска, исполнения и типоразмеры производимой продукции; размеры производственных партий; конфигурация, состав и особенности конструкции; физико-механические параметры применяемых материалов; показатели точности поверхностей (допуски, отклонения формы и расположения); характеристики поверхностного слоя (шероховатость, твердость, микротвердость, глубина наклепа, типы и значения остаточных напряжений и др.); ритм и такт выпуска продукции.

Перед определением назначения ТС должны быть разработаны ТП, которые предполагается реализовать в данной системе. На этой основе задают параметры ТС: конечное множество выполняемых функциональных действий; методы установки и закрепления заготовок, деталей и сборочных единиц с указанием их особенностей; габаритные размеры рабочей зоны; число используемых позиций при обработке; способы и особенности перемещения изготавливаемых изделий от позиции к позиции, порядок загрузки и выгрузки; материалы и габаритные размеры заготовок; количество, методы установки и смены СТО (инструменты, оправки, державки и т. п.); принятую при обработке системе координат; направления, скорости и ускорения основных и вспомогательных перемещений рабочих органов; диапазоны технологических режимов обработки и сборки; технологические нагрузки и энергетические взаимодействия (силы резания, зажима и инерции, давления, мощности приводов и др.); рекомендуемые типы приводов (ручные, электромеханические, магнитные, электромагнитные, гидравлические, пневматические, вакуумные и др.); требуемую точность исполнения базовых элементов ТС; требования к надежности и безопасности. Необходимо также определить степень технологической гибкости, уровни автоматизации и методы управления, габаритные и массовые характеристики ТС, степень технологической и конструктивной преемственности, параметры окружающей среды и методы защиты от ее воздействия, эргономические и другие специальные требования (к консервации, хранению, транспортированию, монтажу, контролю, ремонту и др.).

Таким образом, назначение ТС характеризуется описанием процессов, для реализации которых предназначена данная система. Кроме того, необходимо знать условия эксплуатации и предъявляемые к ТС другие технические требования, связанные например с обеспечением ее надежности.

Требования к новым изделиям оформляются в виде согласованного исполнителем и заказчиком и утвержденного ТЗ, которое является базовым документом при создании изделия. При состав-

ление ТЗ на новое изделие используется сочетание принципа производственной и технологической преемственности с внедрением самых передовых научно-технических решений.

Требования к ТМ реализуются в ее конструкции с учетом комплексов показателей качества и совокупности параметров. Могут быть использованы следующие группы параметров в их техническом выражении: геометрические (линейные и векторные размерные связи, допуски, отклонения формы и расположения поверхностей деталей и сборочных единиц); показатели шероховатости и волнистости поверхностей; физико-механические (масса, силы, напряжения, коэффициенты упругости и пластичности, твердость, ударная вязкость и др.); временные (текущее время, периоды); частотные (частота протекающих процессов, скважность импульсов); кинематические (перемещения, значения и направления скорости и ускорения); динамические (силы, моменты, напряжения, давления, как активные, так и инерционные); виброакустические (интенсивность звуковой волны, амплитуды и спектры колебаний и вибрации); физические (электрические, магнитные) и другие характеристики. Весьма часто учитываются температурные, тепловые, энергетические (в том числе показатели мощности), химические, эргономические, технологические, функциональные, экономические и прочие параметры.

Каждое изделие можно рассматривать как сложную техническую систему, состоящую из определенного числа функциональных секций, блоков, модулей, оригинальных сборочных единиц, деталей и комплектующих элементов.

Основным принципом проектирования следует считать создание комплексов ТМ и ТС на основе *унифицированных структурных компонентов*: секций, блоков, модулей и агрегатов. Совокупность структурных единиц, имеющих наибольшее распространение, — это базовые компоненты комплекса, которые совместно с дополнительными структурными единицами и элементами служат основой для создания его модификаций. Подобный метод разработки изделий представляет собой многоэтапный и многоуровневый процесс, включающий в себя процессы научных исследований, систематизации, классификации, анализа, синтеза, моделирования, функционально-стоимостной оценки и др.

Практика показывает, что основой проектирования следует считать компьютерное информационное моделирование. Компоненты изделия в обобщенном смысле можно рассматривать в качестве функциональных модулей, разбив их на две группы: технологические и обслуживающие. Первые обеспечивают работу машин в соответствии с их назначением (например, для станков такими модулями являются шпиндели, коробки скоростей и по-

дач, самодействующие головки, суппорты, ходовые винты, столы, задние бабки, а вторые — их функционирование электроприводы, станины, корпуса, стойки, системы смазки и охлаждения, устройства активного контроля и др.).

Модули первого уровня могут состоять из функциональных и обслуживающих технологических модулей второго уровня и т.д.

Элементы самого низкого уровня — детали, образующие некоторую пространственную материальную и объемную конфигурацию, ограничены поверхностями, имеющими собственное назначение. При компьютерном моделировании поверхности описываются с помощью обобщенных уравнений типа  $F(Z, Y, X) = C$ , где  $C$  — произвольная постоянная. В ряде случаев применяются системы уравнений в параметрической форме:  $Z = F_1(U, V)$ ;  $Y = F_2(U, V)$ ;  $X = F_3(U, V)$ , где  $U$  и  $V$  — независимые параметры.

Согласно принятой классификации поверхности деталей машин подразделяются на исполнительные, связующие (С), технологические (Т) и свободные (СВ) (рис. 1.5, а), а исполнительные — на базирующие и функциональные (Ф).

*Базирующими* (базами) считаются поверхности, принадлежащие элементам конструкции и определяющие их пространственное положение в собранном изделии. Базирующие поверхности, служащие для приобретения деталью необходимого положения в сборочной единице, называются *основными* (ОБ), а поверхности данной детали, служащие для придания определенного пространственного положения другим деталям, — *вспомогательными* (ВБ). На рис. 1.5, б, в приведены примеры поверхности соответственно для зубчатого колеса со ступицей и участка вала, а на рис. 1.6 — для шестеренного насоса с водяным подогревом, предназначенного для перекачки консистентных жидкостей.

Так, в шестеренном насосе поверхность ОБ между подшипником скольжения 1 (см. рис. 1.6) и обоймой 2 является основной базой, а поверхность ВБ между обоймой и валом 3 — вспомогательной. Базирующие поверхности деталей используются также для выполнения технологических операций обработки и сборки.

*Функциональные* поверхности имеют различное назначение. Например, эвольвентные поверхности Ф (см. рис. 1.6) зубчатых шестерен 5 и 7 служат для создания гидравлического давления перекачиваемой жидкости и одновременно играют роль кинематических поверхностей, передающих вращательное движение от ведущей шестерни 7 к ведомой 5. Боковая поверхность Д шпонки 6 предназначена для передачи вращающего момента от вала к ведущей шестерне, а поверхность Г штифта 4 — к обойме. Поверхность Е необходима для присоединения патрубка, по которому подводится горячая вода, а поверхности Ж служат для

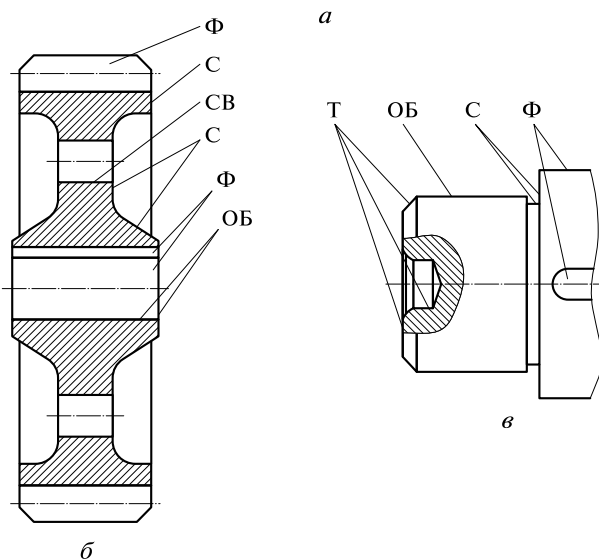
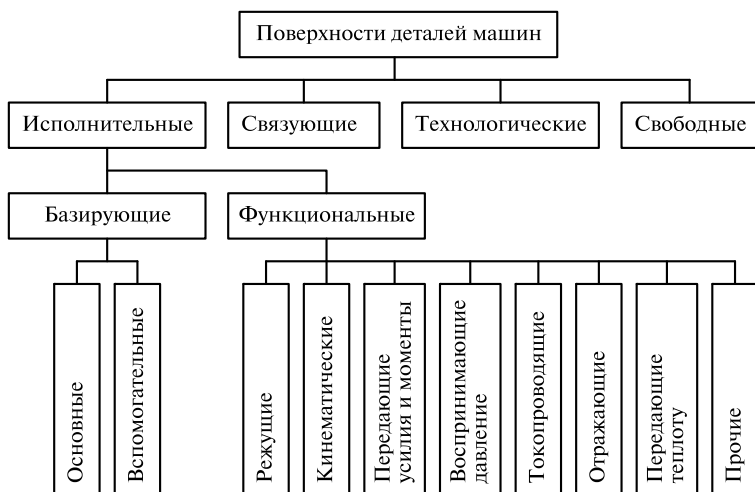


Рис. 1.5. Классификация поверхностей деталей машин (а) и примеры поверхностей для зубчатого колеса со ступицей (б) и участка вала (в)

передачи теплоты к внутренней полости насоса и одновременно воспринимают значительные усилия от гидравлического давления перемещаемой консистентной жидкости.

Таким образом, поверхности деталей и сборочных единиц предназначены для выполнения различных функций, которые могут иметь комплексный характер.

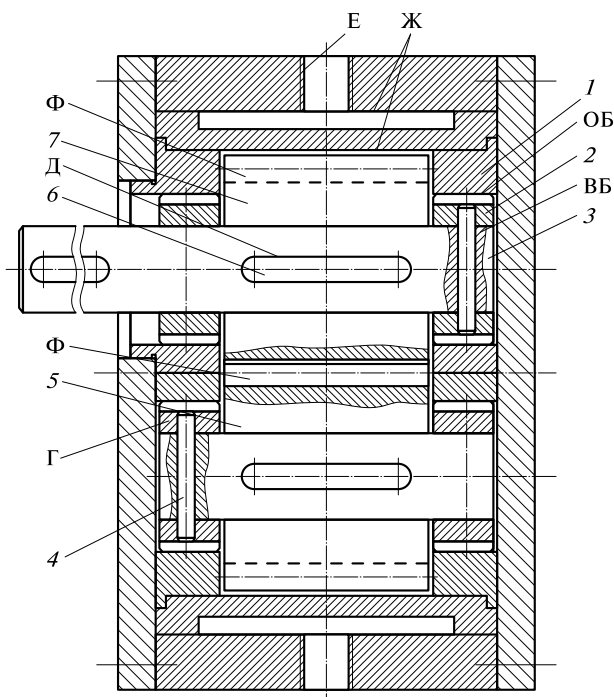


Рис. 1.6. Базирующие и функциональные поверхности шестеренного насоса с водяным подогревом

С точки зрения обработки и сборки для нормальной работы изделия необходимо, чтобы все поверхности деталей и сборочных единиц, определяющие его назначение (функциональные поверхности), занимали строго определенное взаимное положение относительно друг друга.

*Технологические* поверхности служат для выполнения обработки и сборки. Например, центровые отверстия валов служат для установки заготовки детали на станке при обработке. Лыски на шпильке служат для передачи вращающего момента от ключа к детали при сборке методом свинчивания.

*Свободные* поверхности не играют особой функциональной роли, а служат для вспомогательных целей. Так, например, внеосевые отверстия в ступице зубчатого колеса или маховика служат для снижения массы конструкции.

Классификация поверхностей по их назначению позволяет правильно разработать ТП обработки и сборки, сконструировать СТО и выбрать режимы контроля.

## 1.4. Основные сведения о точности обработки

В процессе технологической подготовки производства особое внимание обращается на точность функциональных параметров, а также исполнительных поверхностей деталей и сборочных единиц, которые во многом определяют работоспособность ТМ и ТС (например, на точность рабочих перемещений, подшипниковых узлов, зубчатых передач, ходовых винтов, направляющих и т.д.). Факторы точности подробно анализируют при отработке изделия на технологичность.

*Точность* определяется соответствием изделия или его элемента заранее установленному эталону. Точность оценивается сугубо дифференцированно применительно к конкретному параметру, характеризующему то или иное свойство изделия. Она нормируется в виде одного или чаще двух допустимых отклонений от номинального значения рассматриваемого параметра.

Точность элементов машин и механизмов имеет важное значение для обеспечения их качества. Так, неточно изготовленные кулачки или зубчатые колеса в процессе работы испытывают повышенные вибрационные и динамические нагрузки, что приводит к возрастанию уровня шума, вибрациям, ускоренному износу, усталостному разрушению и выходу изделия из строя. Отклонение требуемой точности деталей станков (шпиндели, подшипниковые узлы, направляющие, корпуса коробок скоростей и подач) снижает общую точность обработки, качество и конкурентоспособность ТМ. Недостаточная точность, отклонения формы и расположения элементов гидравлической и пневматической аппаратуры, насосов и компрессоров вызывают дополнительное перетекание рабочего тела, что снижает его напор и подачу.

Точность может оцениваться как дифференцированно применительно к конкретному параметру, характеризующему то или иное свойство изделия, так и в виде комплексного показателя назначения машины. *Погрешность* нормируется в виде одного или — чаще — двух допустимых отклонений от номинального значения рассматриваемого параметра. В машиностроении необходимо обеспечивать точность прежде всего геометрических параметров (угловые и линейные размеры, координаты, отклонения формы и расположения поверхностей). Многие параметры, например дисбаланс ротора или положение центра масс изделия, в значительной мере связаны с соблюдением геометрической точности деталей и сборочных единиц. Обычно чем выше точность деталей и других элементов машин, тем выше их качество. В то же время достижение требуемой точности деталей вызывает необходимость в дорогостоящей дополнительной обработке.

Себестоимость изготовления обратно пропорциональна допуску на обработку или сборку. Поэтому следует добиваться экономически обоснованной точности элементов машин. Особое значение точность имеет при автоматизации и роботизации производства, когда ТП реализуются при минимальном участии операторов.

В машиностроении эталонами точности могут служить специально изготовленные и аттестованные калибры, концевые меры длины или образцы шероховатости. Применяются эталоны изделий для оценки качества сборки или эталоны деталей для оценки качества механической обработки. Основным способом задания точности в машиностроении является установление технических требований и характеристик, указываемых в чертежно-технической документации. Так, компьютерный чертеж детали служит виртуальным эталоном по всем установленным параметрам.

Точность характеризуется соответствующей погрешностью, которая определяет величину отклонения параметра от его номинального значения. Абсолютная погрешность  $\Delta_X$  выражается в единицах оцениваемого параметра  $X$  и определяется по формуле  $\Delta_X = X_d - X_n$ , где  $X_d$  и  $X_n$  — действительное и номинальное значения параметра  $X$ . Погрешность ряда изделий, например приборов и контрольной оснастки, носит относительный характер и находится посредством деления абсолютной погрешности параметра  $X$  на его номинальное значение, т. е.  $\Delta_X^o = (X_d - X_n)/X_n$  (результат может быть представлен в процентах).

В большинстве случаев погрешность содержит в своей структуре систематическую и случайную составляющие, т. е. характеризуется *случайной функцией параметра*. Как правило, изменение математического ожидания во времени или в процессе эксплуатации машин характеризует систематическую составляющую, а изменение дисперсии или среднеквадратического отклонения — случайную составляющую.

Точность изделий, сборочных единиц и деталей характеризуется не только абсолютной или относительной погрешностью, но и расположением поля рассеяния. Допустимые границы изменения параметра определяются заданным в чертежно-технической документации допуском. Допуски на геометрические размеры, установленные в ГОСТ 25346 — 82, соответствуют международной системе допусков и посадок. Рассмотрим схему образования допусков и посадок в системе отверстий, которая имеет наиболее широкое распространение (рис. 1.7). В этой системе основным является поле допуска  $H$  отверстия. Его нижнее предельное отклонение  $EI$  совпадает с нулевой линией, от которой отсчитываются отклонения, соответствующей номинальному размеру  $A_0$ . Располо-

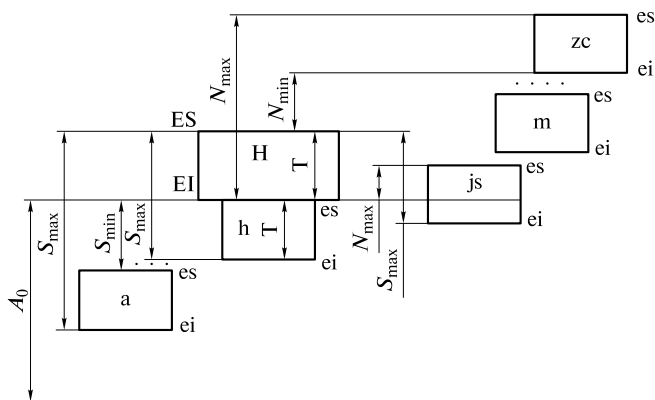


Рис. 1.7. Схема расположения полей допусков в системе отверстия

жение верхнего предельного отклонения  $ES$  зависит от качества  $IT$  геометрического параметра. Значение верхнего предельного отклонения основного отверстия равно  $ES = T$ , т. е. зависит от выбранного качества.

Разные по характеру посадки (с зазором, натягом или переходные) в системе отверстия образуются за счет изменения полей допусков вала ( $a$ ,  $h$ ,  $js$ ,  $m$  и  $zc$ ). Расположение этих полей изменяется в зависимости от их обозначения. Допуски вала от  $a$  до  $h$  образуют совместно с полем допуска  $H$  основного отверстия посадки с зазором. Для допусков вала, образующих посадки с зазором, основным является верхнее предельное отклонение  $es$ , которое применительно к конкретному виду допуска неизменно по величине для всех качеств. Величины  $es$  нормируются в упомянутом стандарте по отклонению от номинального размера. Нижнее предельное отклонение  $ei$  для посадок с зазором находится как  $ei = es - T$ . Максимальный ( $S_{max}$ ) и минимальный ( $S_{min}$ ) зазоры равны  $S_{max} = ES - ei$  и  $S_{min} = EI - es$ .

Поле допуска  $js$  расположено симметрично относительно нулевой линии и образует класс переходных посадок, которые применяются для малоподвижных соединений при необходимости достижения точного центрирования (например, при сборке колец подшипников с корпусом и валом), а также в соединениях изделий точного приборостроения. Переходные посадки в зависимости от сочетания действительных размеров вала и отверстия в пределах своих допусков могут образовывать как зазоры, так и небольшие натяги. Величины максимальных зазоров  $S_{max}$  и натягов  $N_{max}$  для переходных посадок можно определить как  $S_{max} = ES - ei$  и  $N_{max} = es - EI$ . К классу переходных посадок в зависимости от размера допуска



Н основного отверстия в ряде случаев могут быть отнесены посадки, образованные полями допусков  $k$ ,  $l$  и  $m$  вала.

Прочие поля допусков до  $z$  включительно образуют посадки с натягом, применяемые для создания неподвижных соединений. Величины максимальных и минимальных натягов в системе отверстия для подобных случаев вычисляются по формулам  $N_{\max} = es - EI$  и  $N_{\min} = ei - ES$ . При использовании системы вала поле допуска  $h$  является основным, а посадки образуют поля допусков отверстия, имеющие обозначения от  $A$  до  $Z$ . Принципы расчета зазоров и натягов в системе вала аналогичны.

Поверхности деталей и сборочных единиц весьма сложны. Так, на рис. 1.8 представлена реальная поверхность валика в продольном сечении, построенная в отклонениях от номинального цилиндра, измеренных индикатором с ценой деления

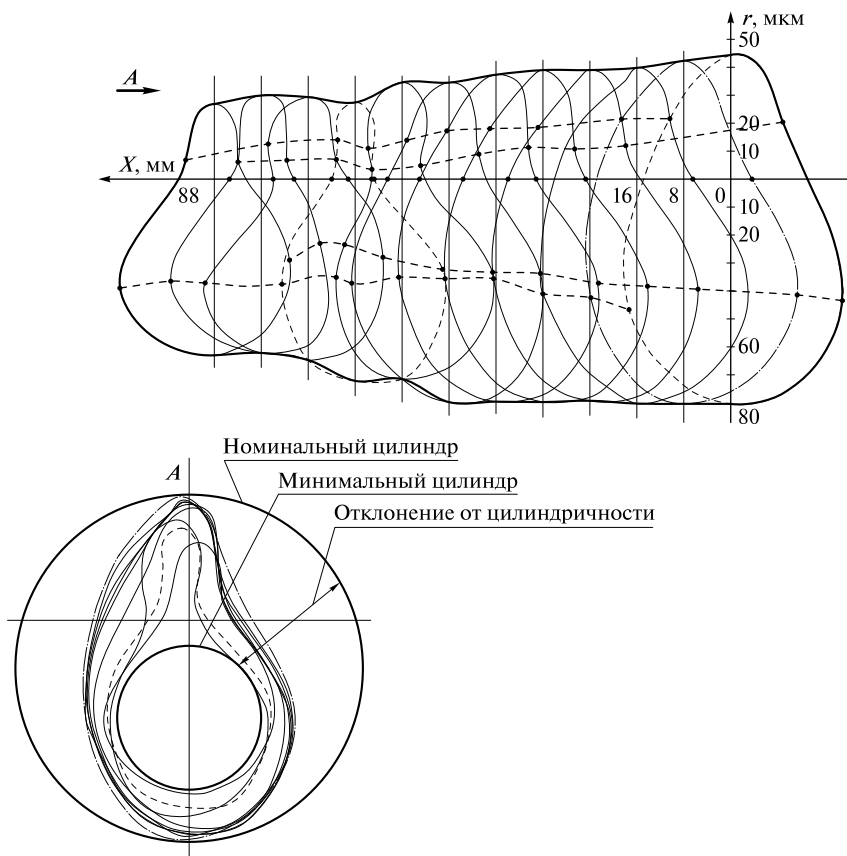


Рис. 1.8. Профиль валика диаметром 16 мм, измеренный в отклонениях

шкалы 1 мкм. При обработке валик закреплялся в патроне с упором по левому торцу. Отчетливо заметен отжим валика при расположении резца у правого торца под действием сил резания. Кроме того, скопирована трехвершинная огранка подшипника шпинделя станка. В этой связи номинальный размер и предельные отклонения, а также действительный размер, измеренный в одной или нескольких точках, характеризуют точность обработки только приблизительно. Реальные профили одинаковых поверхностей у партии деталей можно описать некоторыми сложными гармоническими случайными функциями в трехмерной системе координат. Поэтому действительные размеры принято характеризовать при помощи прилегающих поверхностей в трехмерной системе координат или прилегающих линий в плоских сечениях.

*Прилегающая поверхность* соприкасается с реальной вне материала детали и располагается по отношению к реальной поверхности так, что расстояние от наиболее удаленной точки последней до прилегающей поверхности минимально. Так, в радиальном сечении цилиндрической поверхности детали для оценки действительных размеров, а также отклонений формы и расположения может быть применена *прилегающая окружность*. Для сечения вала (рис. 1.9) номинальным диаметром  $D_0$  прилегающая окружность является окружностью минимального диаметра, описанной вокруг реального профиля, а для сечения

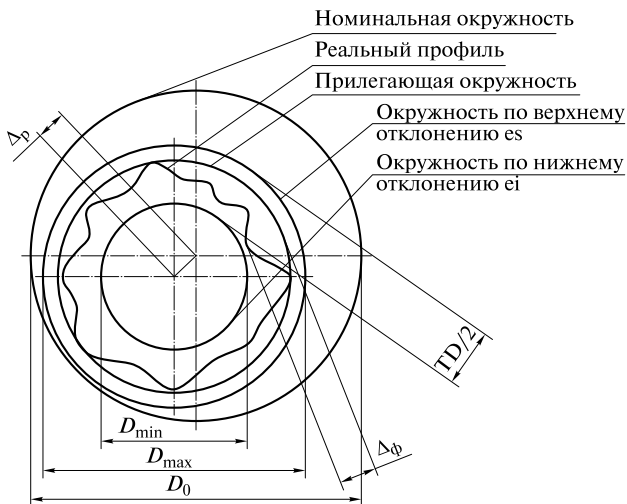


Рис. 1.9. Геометрическое представление погрешностей номинального размера, формы и расположения в сечении цилиндрической поверхности вала



Рис. 1.10. Геометрическое представление допуска номинального размера, формы и расположения в сечении плоской детали

отверстия — окружностью максимального диаметра, вписанной в реальный профиль. Диаметр прилегающей поверхности служит характеристикой действительного размера детали, выполнение которого в пределах допуска обеспечит собираемость сопрягаемых деталей.

*Отклонение расположения*  $\Delta_p$  представляет собой отклонение прилегающей поверхности от номинального расположения рассматриваемой поверхности. Чаще всего с целью определения  $\Delta_p$  рассматривают отклонения осей или плоскостей симметрии. *Отклонение формы*  $\Delta_\phi$  — это максимальное отклонение реального профиля от прилегающей поверхности, измеренное по нормали к последней. Шероховатость поверхности при определении отклонений формы не учитывается.

Применительно к плоским деталям может быть использовано понятие «прилегающая плоскость», а для произвольного сечения — «прилегающая прямая». Так, прилегающая прямая на рис. 1.10, соприкасающаяся с реальным профилем вне детали, располагается по отношению к нему так, что расстояние от его наиболее удаленной точки до прилегающей прямой минимально. Реальный профиль детали при определении прилегающих поверхностей или линий служит основой для нахождения отклонений формы  $\Delta_\phi$  и расположения  $\Delta_p$ .

Следует отметить, что *теория прилегающих поверхностей* применима только при обеспечении механической собираемости изделий для посадок деталей с гарантированным или нулевым зазором. Например, для герметичности гидравлических элементов необходимо обеспечить не только прилегание охватываемой и

охватывающей поверхностей по вершинам профилей, но и минимизацию зазоров между поверхностями. В процессе запрессовки вала в отверстие происходит упругопластическая деформация деталей по всей площади сопряжения. В подобных случаях следует рассматривать средние уровни поверхностей.

Точность параметра устанавливается при измерении и характеризуется погрешностью, которая определяет отклонение действительного значения параметра от его номинального значения. Так, на действительную точность ТП влияют *погрешности контрольных измерений*, которые зависят от принятых методов измерения, технической реализации измерительного прибора (контрольно-измерительной оснастки) и субъективных факторов.

Абсолютная погрешность измерения  $\Delta_n$  представляет собой разность между значением величины  $A_n$ , полученной при измерении, и ее истинным значением  $A_0$ , т.е.  $\Delta_n = A_n - A_0$ . Абсолютная погрешность измерения выражается в единицах измеряемой величины.

Относительная погрешность измерения  $\Delta_o$  представляет собой отношение абсолютной погрешности к истинному значению измеряемой величины, т.е.  $\Delta_o = \Delta_n/A_0$  (результат можно представить также в процентах). Погрешность измерения прибора может составлять 0,05; 0,1; 1 % и т.д.

Погрешности измерения приборов и контрольно-измерительной оснастки нормируются в рамках Государственной системы обеспечения единства измерений. Применяемые на производстве приборы подвергаются регулярной метрологической поверке с использованием измерительных эталонов и специальных методик. Погрешности измерения входят в общую структуру погрешностей технологического процесса (обработка, сборка и т.п.).

Под действием систематических и случайных факторов действительные значения измеряемой величины при обработке партии заготовок деталей отличаются друг от друга. Разность между наибольшим и наименьшим значениями измеряемой величины при контроле некоторой величины образует *поле рассеяния*, которое характеризуется вероятностными и статистическими характеристиками (математическое ожидание, дисперсия, среднеквадратическое отклонение и др.). В условиях производства поле рассеяния параметра должно находиться в пределах поля допуска. Нарушение данного условия приводит к возникновению производственного брака. Если заготовку можно исправить посредством дополнительной обработки, например с помощью шлифования после обнаружения в результате контроля завышенного размера, то такой брак считается *исправимым*. Если подобная дообработка невозможна (полученный размер вала меньше нижнего предельного отклонения), то брак считается *неисправимым*.

При конструировании физических установок, например, требующих создания стабильных электрических (окраска в электростатическом поле) или магнитных (магнетронное распыление ионов при нанесении износостойких покрытий) полей, их функциональные характеристики описываются сложными математическими выражениями. Поэтому представление о геометрической модели поверхности следует формировать в зависимости от ее назначения. В общем случае необходимо рассматривать не только геометрические, но и в совокупности с ними физико-механические или структурно-физико-химические (поверхностные или объемные) модели с учетом свойств применяемых материалов и атомно-молекулярного строения вещества. При определении статической и динамической погрешностей используются векторная алгебра, теории колебаний, рядов, вероятностей, математической статистики и др. Обеспечение точности заданных параметрических свойств машин технологическими методами требует углубленного научного подхода.

Точность взаимного положения определяется базирующими поверхностями. При обеспечении требуемой точности обработки и сборки необходимо учитывать различные производственные погрешности и выполнять пересчет координат деталей относительно системы координат изделия. Расчет точности при обработке связан с системами координат заготовки, станка и СТО. Если назначение машин определяет некоторый показатель качества  $Y = F(X_1, X_2, \dots, X_i, \dots, X_n)$ , где  $X_1, X_2, \dots, X_i, \dots, X_n$  — геометрические и иные параметры деталей машин, то при переходе к погрешностям после разложения функций  $Y$  в ряд Тейлора имеем

$$\Delta Y \approx \frac{\partial Y}{\partial X_1} \Delta_{X_1} + \frac{\partial Y}{\partial X_2} \Delta_{X_2} + \dots + \frac{\partial Y}{\partial X_i} \Delta_{X_i} + \dots + \frac{\partial Y}{\partial X_n} \Delta_{X_n}, \quad (1.1)$$

где  $\Delta_Y$  — погрешность показателя качества;  $\partial Y / \partial X_i$  — передаточное отношение;  $\Delta_{X_i}$  — погрешность  $i$ -го параметра.

Замена погрешностей  $\Delta_{X_i}$  величинами полей допусков  $T_{X_i}$  ( $i = 1, \dots, n$ ) позволяет найти допуск  $T_Y$  на вариацию показателя качества. При рассмотрении всех показателей качества можно получить совокупность (т. е. математическую систему) размерных, а в общем случае — параметрических связей, описываемых уравнениями типа (1.1). В процессе комплексного параметрического и размерного анализа устанавливаются допуски на систему параметрических и размерных связей и ее элементы. В период технологической подготовки производства обеспечивается выполнение всех требуемых параметров точности машины, которые реализуются при изготовлении, контроле и испытаниях изделий.