

**А.В. Якимов, Ф.В. Новиков,
А.А. Якимов, Г.В. Новиков, Н.И. Решетнев**

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИИ МАШИНОСТРОЕНИЯ

*Допущено Министерством образования
и науки Украины в качестве учебника
для студентов машиностроительных
специальностей
(Письмо №1/11-1175 от 13.04.2001 г.)*

Одесса ОНПУ 2002

ББК 27.4

М 33

УДК 621.91.002(075)

А в т о р ы: А.В.Якимов (Приложение, главы 1, 2, 3, 4, 8),
Ф.В. Новиков (главы 2, 9, 10, 11), А.А. Якимов (главы 2, 5, 6, 7, 8, 10),
Г.В. Новиков (главы 3, 8, 9, 10), Н.И. Решетнев (главы 5, 9, 10, 11).

Рецензенты:

Кафедра приборостроения Луцкого государственного технического университета, зав. кафедрой доц. канд. техн. наук Марчук В.И.

Кафедра технологии машиностроения Пермского политехнического университета, канд. техн. наук Грисенко Е.В.

В учебнике рассмотрены вопросы базирования, качества и точности изготовления деталей в условиях автоматизированного производства. Специальная глава посвящена оптимизации технологических процессов. Приведены различные варианты расчета технологических размерных цепей с позиций размерного анализа. Рассмотрены методологические подходы к разработке высоких компьютерных технологий.

Для студентов машиностроительных специальностей высших учебных заведений.

Ил. 215, табл. 54, библиогр. 92 наим.

Якимов А.В. и др.

М 33 Теоретические основы технологии машиностроения:

Учебник /Якимов А.В., Новиков Ф.В., Якимов А.А., Новиков Г.В., Решетнев Н.И. - Одесса, ОНПУ, 2002.- 491 с.

ISBN 966-7565-05-4

Предисловие

Технология машиностроения – это наука об изготовлении машин требуемого качества в установленном производственной программой количестве и в заданные сроки при наименьших затратах живого и автоматизированного труда, то есть при наименьшей себестоимости [7]. Данное определение, по сути, является формулировкой задачи оптимизации с указанием целевой функции – себестоимости и технологических ограничений. Выбор оптимальных вариантов решения требует построения математических моделей технологических процессов, учитывающих многообразие факторов, которые определяют возможности методов механической и физико-технической обработки, оборудования, инструмента, технологической оснастки, кинематических схем станков и способов базирования заготовок при обработке. Установить замкнутую систему математических уравнений, с единых позиций описывающих процессы создания машин, весьма сложно.

Для решения задач оптимизации в технологии машиностроения необходимо прежде всего на фундаментальном уровне формализовать процессы обработки и на этой основе выявить и обосновать их технологические возможности. С этой целью в представленном учебнике рассмотрены научные подходы к анализу точности обработки с учетом износа режущего инструмента и податливости упругой системы. Рассмотрены методы определения жесткости упругой системы станков и влияние динамики процесса резания на точность обработки. Рассмотрены законы распределения погрешностей и практическое их применение в технологии машиностроения. С использованием принципа совмещения баз рассмотрен на конкретных примерах размерный анализ технологических процессов. Рассмотрен механизм структурных превращений с учетом термических циклов в зоне резания. Большое внимание уделено вопросам оптимизации технологических процессов, проведен поиск оптимальных технологических решений в условиях неопределенности. Рассмотрена химико-термическая обработка в структуре технологического процесса и физико-

химические методы обработки поверхностей. Рассмотрены причины образования шероховатости поверхности, кинетика формирования временных термоупругих напряжений в поверхностных слоях деталей. Установлена связь эксплуатационных характеристик деталей с качеством поверхностного слоя. Рассмотрена сущность прерывистого шлифования и область рационального его применения. Специальная глава посвящена рассмотрению различных методов оптимизации технологических процессов.

Такое изложение научно-теоретических и инженерных проблем в курсе «Технология машиностроения» способствует повышению общенаучной теоретической подготовки инженеров и практическому использованию достижений фундаментальных наук при решении производственных задач.

Теоретические основы отдельных разделов курса технологии машиностроения изложены на достаточно высоком научном уровне и отражают приоритет украинской науки.

При написании учебника широко использовался накопленный опыт преподавания курса «Технология машиностроения» и методические разработки кафедр различных вузов Одессы, Челябинска, Перми, а также материалы УкрНИИСИП и заводов Украины и России.

Введение

Машиностроение, обеспечивающее все отрасли народного хозяйства, определяет уровень технического прогресса и оказывает решающее влияние на создание материально-технической базы. В связи с этим развитию машиностроения придается первостепенное значение.

Развитию и формированию учебной дисциплины «Технология машиностроения» предшествовал процесс непрерывного совершенствования машиностроения на протяжении двух столетий.

Одним из выдающихся русских механиков был М.В. Сидоров, создавший в 1711 году на Тульском оружейном заводе станок для сверления оружейных стволов.

В этот же период (1718 – 1725) русский механик-изобретатель А.К. Нартов создал суппорт для токарного станка и ряд других станков (токарный, зуборезный).

К тому же времени относится деятельность гениального русского ученого М.В. Ломоносова (1711 – 1765), который изготовил сферотокарный и шлифовальный станки.

Изобретатель паровой машины И.И. Ползунов (1728 – 1764) изготовил расточной станок. Русский механик И.П. Кулибин (1735 – 1818) создал специальный станок для изготовления зубчатых колес часовых механизмов. В конце XIX и в начале XX столетия на тульских оружейных заводах применялся принцип взаимозаменяемости. Успешному внедрению принципа взаимозаменяемости содействовали русские мастера-лекальщики, изготавливающие сложные калибры с высокой для того времени точностью и имеющие металлорежущие станки и инструменты, позволяющие изготавливать детали с требуемой точностью.

Начало изучения технологических процессов, т. е. способов обработки заготовок, в результате которых получается готовое изделие, соответствующее заданным размерам, форме и качеству, положил в 1804 году академик В.М. Саверин. Он впервые сформулировал положения о технологии и определил, что технология – наука о ремеслах

и заводах. В 1819 году проф. Московского университета И.А. Двигубский издал книгу «Начальные основания технологии, как краткое описание работ на заводах».

Первым капитальным трудом, посвященным технологии металлообработки, является трехтомный труд проф. И.А. Тиме «Основы машиностроения» (1885). И.А. Тиме впервые сформулировал основные законы резания и установил правильное понимание сущности этого процесса как последовательного скалывания отдельных элементов металла.

Начало формированию технологии машиностроения как науки относится к периоду выхода научных трудов советских ученых: проф. А.П. Соколовского, А.И. Каширина, В.М. Кована, А.Б. Яхина и др. В период 1930 – 1941 гг. разрабатываются принципы типизации технологических процессов (проф. А.П. Соколовский, Ф.С. Демьянюк и др.) и осуществляется их практическое внедрение; создаются методы расчета припусков на обработку (проф. В.А. Кован, А.П. Соколовский, Б.С. Балакшин, А.И. Каширин и др.) В то же время начинается разработка расчетно-аналитических методов определения погрешностей обработки (проф. А.П. Соколовский, Б.С. Балакшин, В.С. Корсаков, А.Б. Яхин и др.) и применение методов математической статистики и теории вероятности при расчете точности обработки (проф. А.А. Зыков, А.Б. Яхин).

Исключительно интенсивным развитием технологии машиностроения характеризуется период 1941–1970 гг., включающий годы войны и послевоенные годы. В эти годы формируется современная теория точности (проф. А.П. Соколовский, Б.С. Балакшин, В.М. Кован, В.С. Корсаков). Детально разрабатывается теория базирования обрабатываемых заготовок (проф. Б.С. Балакшин, А.А. Маталин, И.М. Колесов, В.С. Корсаков). Развиваются теоретические и экспериментальные исследования качества обрабатываемых поверхностей и влияние качества на эксплуатационные характеристики деталей машин (проф. П.Е. Дьяченко, Б.Д. Грозин, А.А. Маталин, А.И. Исаев, А.И. Каширин, Б.И. Костецкий, Б.А. Кравченко, И.В. Крагельский, И.В. Кудрявцев, Э.В. Рыжов, А.М. Сулима, А.В. Якимов, В.А. Сипайлов, А.В. Подзей, Ю.Г. Шнейдер, П.А. Линчевский и др.). Развертываются работы по изучению влияния динамики технологических систем на точность механической обработки, шероховатость и волнистость обработанных поверхностей (проф. И.С. Амасов, А.И. Каширин, В.А. Кудинов, А.П. Соколовский). Разрабатывается и внедряется

в производство групповой метод технологии и организации производства (проф. С.П. Митрофанов). На базе типизации технологических процессов и использования переналаживаемого оборудования и оснастки создаются поточные линии в серийном производстве (проф. В.В. Бойцов, Ф.С. Демьянюк). Систематизируются и обобщаются материалы по технологии сборки и разрабатываются ее научные основы (проф. В.С. Корсаков, М.П. Новиков).

Отличительной особенностью современного этапа развития технологии машиностроения (с 1970 года по настоящее время) является широкое использование достижений фундаментальных наук для решения технологических задач с широким использованием ЭВМ. Осуществляется автоматизация проектирования технологических процессов – САПР ТП (проф. Г.К. Горанский, Н.М. Капустин, А.С. Старец, С.П. Митрофанов, В.Д. Цветков и др.). Большое внимание уделяется проблеме увеличения долговечности деталей технологическими методами. Важные научные результаты в этой области получены при изучении физических закономерностей процесса шлифования абразивно-алмазными кругами, полученные в работах В.Н. Бакуля, А.П. Гавриша, В.Н. Вerezуба, В.Г. Лебедева, А.Е. Проволоцкого, А.В. Усова, Ф.В. Новикова, Л.В. Худобина, М.Д. Узуняна, А.В. Якимова, Н.К. Беззубенко, А.И. Грабченко, С.А. Попова, А.Ф. Раб, В.А. Рыбицкого, В.П. Ларшина, Ю.А. Савченко, О.А. Химач, А.А. Шепелева и др.

Новые научные результаты получены на основе теоретико-вероятностного подхода к теории шлифования профессорами Д.Г. Евсеевым, С.Н. Корчаком, А.В. Королевым, Ю.К. Новоселовым, Ф.В. Новиковым, В.И. Островским, А.И. Сальниковым, А.Н. Резниковым, Л.Н. Филимоновым, О.Б. Федосеевым, а теоретические исследования закономерностей кинематики шлифования проведены Е.Н. Масловым, С.Г. Редько, А.А. Якимовым, П.И. Ящерицыным, А.К. Байкаловым и др.

Бурное развитие двигателестроения, авиационной и космической техники предопределило создание компьютерных технологий с использованием гибких производственных систем (ГПС). Ведутся работы по созданию общей математической теории технологии машиностроения, механической и физико-технической обработки на основе новой методологии, базирующейся на фундаментальных законах физики и механики.

Технология машиностроения как учебная дисциплина имеет ряд особенностей, существенно отличающих ее от других специальных дисциплин:

1. Технология машиностроения является прикладной наукой, которая непосредственно связана с развивающейся промышленностью.

2. Являясь прикладной наукой, технология машиностроения вместе с тем базируется на фундаментальных науках. Она имеет теоретическую основу, включающую в себя: учение о точности, качестве поверхностного слоя, размерном анализе, оптимизации параметров, по разработке компьютерных технологий, по расчету размерных цепей, рассеянии размеров; учение о типизации технологических процессов и групповой обработке, о жесткости упругой технологической системы, погрешностях технологической оснастки и оборудования, о явлениях, происходящих в поверхностных слоях шлифуемых деталей под действием высоких температур и давления.

3. Технология машиностроения является комплексной инженерной и научной дисциплиной, имеющей неразрывную связь с такими дисциплинами, как теория резания, металлорежущие станки и инструменты, допуски, технические измерения, материаловедение и термическая обработка. Рассмотрение технологических процессов без использования этих наук вообще невозможно. Современные направления в области создания компьютерных технологий, структурной и параметрической оптимизации, создания адаптивных и интеллектуальных систем основываются на достижениях математики, электронной, вычислительной и управляющей техники, кибернетики, радиотехники, металлофизики и других современных теоретических и технических науках.

4. Технология машиностроения является основной профилирующей дисциплиной, в значительной мере определяющей уровень профессиональной подготовки инженеров и их способности к практическому использованию общетеоретических и общепромышленных наук.

Концепции обучения инженера-механика должны состоять из трех актов: информационного, аналитического и синтетического.

Первый акт знаний (информационный), ставит и отвечает на вопросы: что, где, когда, сколько? Традиционный набор дисциплин гуманитарного профиля готовит студентов к ответу на поставленные вопросы.

Второй акт знаний (аналитический) ставит и отвечает на вопрос: как сделать? Второй акт знаний обеспечивают инженерно-технические дисциплины.

Третий акт знаний требует синтеза информации с целью обеспечить понимание сути (проблемы, явлений). Этот акт знаний ставит и отвечает на вопрос: почему?

Основная цель курса технологии машиностроения – обеспечить понимание проблемы. Следовательно, центр знаний в высшей школе должен сместиться в сторону понимания существа проблемы.

Г Л А В А 1

ОБЪЕКТ ПРОИЗВОДСТВА, СПОСОБЫ ПОЛУЧЕНИЯ ЗАГОТОВОК И ВИДЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

1.1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Производственным процессом завода (производственного участка, цеха) называют весь комплекс процессов организации, планирования, снабжения, изготовления, контроля и т. д., необходимых для превращения поступающих на завод (участок, цех) материалов и полуфабрикатов в готовую продукцию. В производственном процессе наиболее важное место занимают технологические процессы, непосредственно связанные с превращением материалов и полуфабрикатов в готовые изделия.

Технологический процесс – это часть производственного процесса, во время которого происходит изменение качественного состояния объекта производства (материалы, заготовки, детали, машины).

Для получения продукции требуемого качества применяют различные процессы обработки: литье, обработку давлением, резание, термическую обработку, покрытие, сборку, сварку и т. д. Под технологическим процессом механической обработки деталей понимают последовательное превращение заготовки в готовую деталь путем механической обработки поверхностей заготовки. Основным элементом технологического процесса является операция.

Операция – это часть технологического процесса, выполняемая на одном рабочем месте до перехода к обработке следующей детали.

Операция является основой производственного планирования и учета. На основе операции определяются трудоемкость изготовления деталей, узлов, изделий, потребное количество рабочих, оборудования, приспособлений и инструментов, устанавливается себестоимость обработки, производится календарное планирование и контроль про-

изводства. Операция может выполняться за один или за несколько установов обрабатываемой детали.

Установ – это часть операции, выполняемой при одном закреплении заготовки. Во многих случаях операцию делят на позиции. Позиция характеризует фиксированное положение заготовки, занимаемое относительно инструмента или неподвижной части станка. Например, фрезерование каждой из четырех граней головки болта при одном его закреплении в делительном приспособлении. Операция разделяется на технологические переходы.

Технологический переход – законченная часть технологической операции, характеризующаяся постоянством применяемого инструмента и обрабатываемых поверхностей.

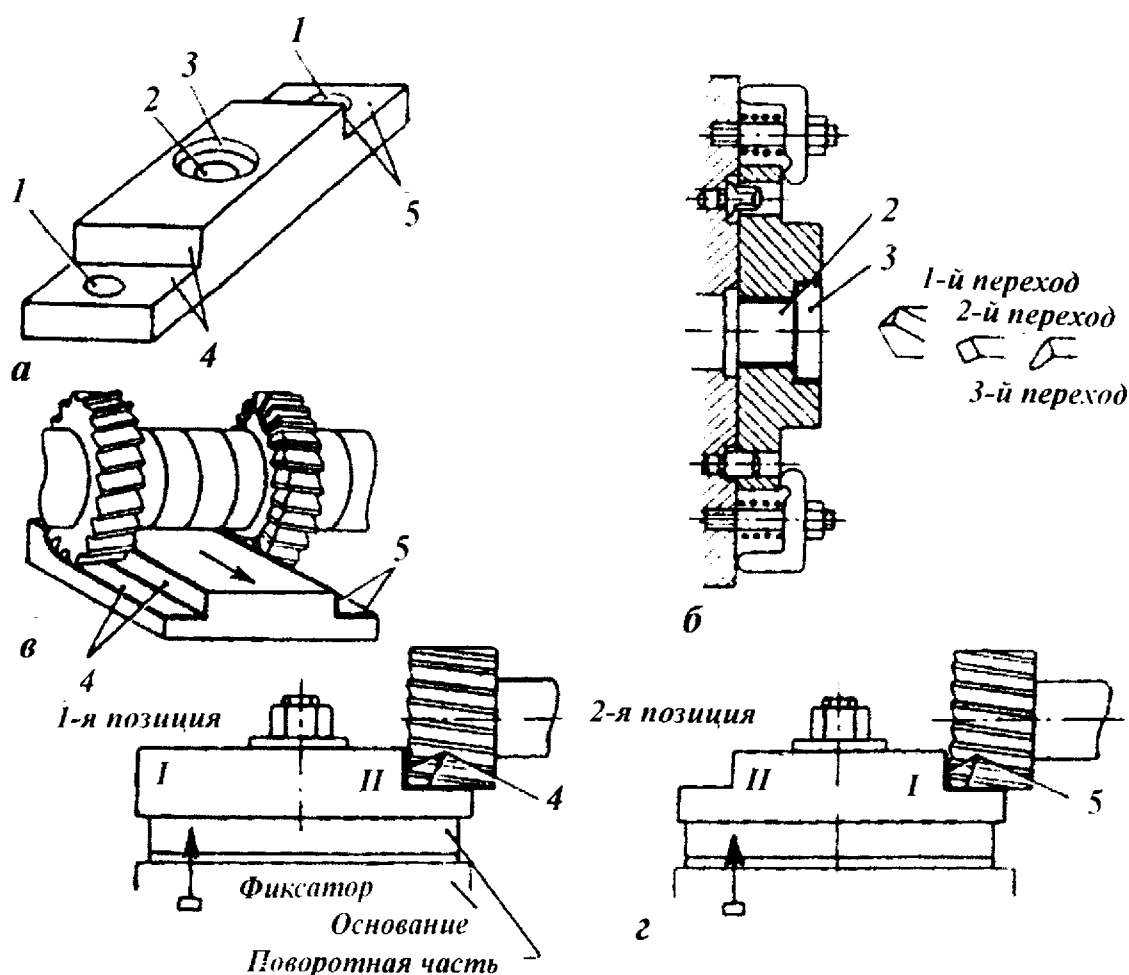


Рис. 1.1. Схемы, поясняющие структуру технологического процесса

В ряде случаев из-за недостаточной мощности привода станка, прочности и жесткости детали и инструмента удалить припуск за один технологический переход не представляется возможным. В этом случае припуск удаляется за несколько проходов.

Проходом называется часть перехода, состоящая из однократного перемещения инструмента относительно заготовки, сопровождаемого изменением формы, размеров, шероховатости поверхности и физико-механических свойств поверхностного слоя.

На рис. 1.1 приведены различные методы обработки детали, поясняющие структуру технологического процесса.

Например, операция обработки отверстия производится за три перехода: сверление и растачивание отверстия – 2 и растачивание выемки – 3 (рис. 1.1, б). Для повышения производительности часто объединяют несколько переходов в один сложный (совмещение переходов), характеризующихся одновременной обработкой нескольких поверхностей (рис. 1.1, в).

Если плоскости 4 и 5 у детали (рис. 1.1, а) фрезеровать только одной фрезой (рис. 1.1, г), то после обработки плоскости 4 требуется снять деталь из приспособления, перевернуть, снова установить и закрепить для обработки плоскости 5. В этом случае операция выполняется за две установки детали.

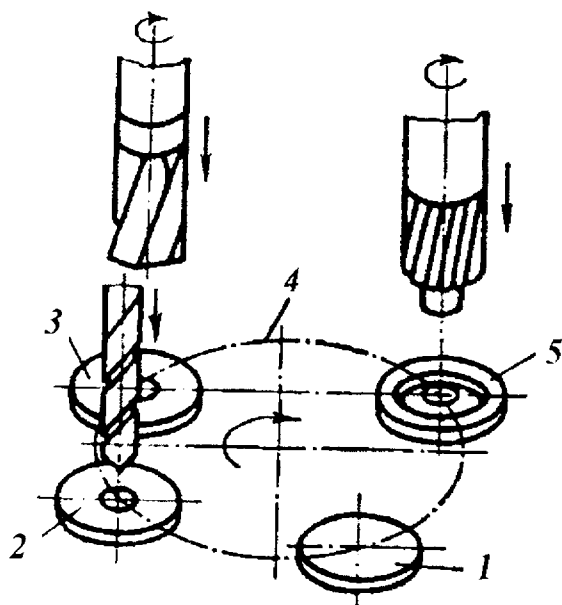


Рис. 1.2. Четырехпозиционная обработка детали на трехшпиндельном станке: 1 – установка и съем детали; 2 – сверление; 3 – зенкерование; 4 – стол; 5 – зенкование

Если для установки и закрепления детали использовать поворотное приспособление, то для обработки поверхностей 4 и 5 не требуется откреплять, снимать и переустанавливать деталь в новое положение, а достаточно повернуть верхнюю часть приспособления с закрепленной деталью на 180° (рис.1.1,г). Иначе говоря деталь из одной позиции переводится в другую.

На рис. 1.2 представлена схема обработки детали на трехшпиндельном сверлильном станке.

На первой позиции деталь устанавливается и закрепляется в самоцентрирующем патроне. После каждого рабочего хода многошпиндельной головки станка деталь вместе с патроном перемещается из

одной позиции в другую.

После завершения цикла обработки, включающего три рабочих позиции, деталь снова возвращается в первую позицию, где производится снятие обработанной детали и установка новой заготовки. На поворотном столе 4 закреплены четыре трехкулачковых патрона для одновременной обработки трех деталей и смены четвертой.

1.2. ВИДЫ ОПЕРАЦИЙ И ЭТАПЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА

Для превращения заготовки в готовую деталь с каждой ее поверхности снимается слой металла, называемый припуском.

Общий припуск может быть снят в одной операции или за несколько операций. Причем каждая последующая операция должна отличаться от предыдущей меньшим операционным припуском и большей точностью.

В связи с этим различают следующие виды операций: обдирочные, черновые, чистовые, окончательные и отделочные.

Обдирочной называют первую операцию, на которой снимается большая часть общего припуска (до 60%). Точность обработки при этом низкая, но выше точности заготовки.

Черновой называют любую операцию, если за ней следует аналогичная по методу обработки, но более точная операция, называемая чистовой. На этой операции удаляется до 30% общего припуска.

Чистовой называют операцию, следующую за черновой. Целью ее может быть завершение обработки данной поверхности (тогда эта операция является одновременно и окончательной) или подготовка поверхности к более точной обработке.

Окончательной называют последнюю операцию, которая обеспечивает заданную рабочим чертежом точность и шероховатость поверхности.

Отделочной называют окончательную операцию, если она сопровождается снятием очень малого припуска. Она обеспечивает особенно высокие требования по точности размеров, формы и взаимного расположения поверхностей и шероховатости поверхности. Количество операций назначают в зависимости от многих частных условий. К ним относятся размеры и форма поверхности, требуемая чертежом точность обработки, вид и место требуемой термической обработки и др.

Обычно количество операций тем больше, чем сложнее эти условия. Например, в технологических процессах обработки высокоточных тяжело нагруженных валов количество операций может достигать до 7 и более. Например, обдирка, обтачивание черновое, обтачивание чистовое, шлифование под цементацию, черновое и чистовое шлифование после цементации и закалки и наконец суперфиниш, а торцы вала обрабатываются только два – три раза.

Обработка одной поверхности в несколько операций обусловлена следующими причинами: во-первых, это нужно для обеспечения заданной точности детали, во-вторых, это нужно для более лучшего использования оборудования.

Черновые и обдирочные операции должны выполняться на станках с повышенной мощностью приводов. Промежуточные операции нужно выполнять на станках с меньшей мощностью приводов, но они должны обеспечивать более высокую точность.

1.3. ВЫБОР ЗАГОТОВОК И СПОСОБЫ ИХ ПОЛУЧЕНИЯ

При проектировании машин конструктор назначает марку материала, из которого будут изготовлены детали. Выбор марки материала производится с учетом характера работы детали в машине, требуемой прочности и геометрической формы.

Одной из главных задач, решаемых при разработке технологического процесса, является выбор заготовки.

Технолог, руководствуясь чертежом, определяет способ получения заготовки с учетом марки материала, формы и размеров детали, производственной программы, предусматривая при этом возможно большую экономию средств и времени на изготовление.

Например, если на чертеже детали указана сталь, то заготовки получают ковкой, штамповкой или из прутка; если указаны чугун или цветные сплавы (бронза, силумин и др.), то заготовки получают литьем. Они по форме и размерам должны приближаться к размерам готовой детали. Выбрать заготовку – это значит установить способ ее получения, назначить припуски на обработку каждой поверхности, рассчитать ее размеры и указать допуски на изготовление.

В зависимости от назначения детали, ее формы, размеров и программы выпуска применяются различные способы получения заготовки: в единичном и мелкосерийном производствах заготовки про-

стых форм с плоской поверхностью отливаются в песчаных формах с ручной формовкой по деревянным моделям.

В серийном и массовом производствах при отливке заготовок, имеющих форму тел вращения, применяют машинную формовку.

Отливки сложной формы изготавливают по выплавляемым моделям. Выплавляемые модели получают из смеси парафина, церезина, стеарина и др. Такая смесь перемешивается и в расплавленном виде под давлением подается в металлическую пресс-форму. Из восковых моделей комплектуется литейная форма для отливки деталей. Перед заливкой жидкого металла литейную форму нагревают до температуры выше температуры плавления материала модели. Модель при этом расплавляется и вытекает из формы. Форму заполняют жидким металлом.

Заготовки деталей типа втулок, червячных зубчатых колес и других деталей из чугуна и бронзы получают заливкой жидкого металла в кокиль (разъемную металлическую форму, которую раскрывают после затвердения металла).

При больших программах выпуска применяют центробежное литье. Под действием центробежных сил металл прижимается к стенкам формы, и отливки получаются с уплотненной структурой с минимальными припусками под обработку резанием.

Более экономичным по сравнению с литьем по выплавляемым моделям является литье в оболочковые разъемные формы. Оболочковые формы изготавливают из формовочной смеси, состоящей из мелкого кварцевого песка с 4 – 6% пульвербакелита, представляющего собой термореактивную смолу. Собранную оболочковую форму перед заливкой устанавливают в металлический ящик. Пространство между формой и металлическим ящиком заполняют формовочной смесью.

Заготовки для тяжелонагруженных деталей, работающие с большими окружными скоростями, получают методом пластического деформирования: свободной ковкой, горячей и холодной штамповкой.

В единичном и мелкосерийном производствах поковки изготавливают свободной ковкой на молотах и прессах.

Горячую штамповку широко используют в серийном и массовом производствах.

Штампованные заготовки получают:

1. Комбинированной ковкой и горячей объемной штамповкой.

2. Штамповкой в подкладных штампах.
3. Штамповкой в закрытых безоблойных штампах.
4. Штамповкой жидкого металла.
5. Холодной штамповкой-высадкой.

Способ комбинированной ковки и горячей штамповки уменьшает расход металла на 40 – 50% по сравнению со свободной ковкой.

При изготовлении заготовок сплошной формы применяют многогоручьевую штамповку с обрезкой облоя.

Штамповка в открытых штампах сопровождается потерей металла на образование облоя (до 20% массы заготовки).

Безоблойная штамповка в закрытых штампах требует более точной дозировки исходной заготовки: допускаемые отклонения по массе составляют + 5%.

Большое преимущество по сравнению с ковкой на молотах и прессах имеет ковка на горизонтально-ковочных машинах. Эти машины позволяют использовать штампы закрытого типа для безоблойной штамповки. На горизонтально-ковочных машинах штампуют стержни с утолщениями на концах, фланцы с двумя буртами, зубчатые колеса и т. д.

Сущность горячей штамповки жидкого металла заключается в следующем. Свободно залитый в форму металл выдавливается под давлением пуансона в полость формы и затвердевает. Припуск на обработку резанием составляет 0,5 – 1,0 мм.

Холодную штамповку-высадку производят на высадочных автоматах. Таким способом получают заготовки болтов, винтов и других простых деталей. Холодная высадка применима для стальных прутков диаметром не более 25 мм. Производительность холодно-высадочных автоматов во много раз превосходит производительность металлорежущих автоматов. Если заготовку можно получить различными способами, то невольно возникает вопрос: а какой из них наиболее экономичен?

Одним из критериев, по которому оцениваются технико-экономические показатели, является коэффициент использования материала K_m . Этот коэффициент характеризует отношение физической массы готовой детали q к массе заготовки Q .

Чем выше коэффициент использования материала, тем меньше расходуется материала, электроэнергии и инструмента.

$$K_M = \frac{q}{Q} \geq 0,8.$$

Для снижения затрат на изготовление заготовок и повышения производительности труда требуется создавать заводы по изготовлению заготовок для машиностроительных предприятий.

1.4. ПРИПУСКИ НА ОБРАБОТКУ

Припуск – слой металла, удаляемый с поверхности заготовки в целях достижения заданных свойств обрабатываемой поверхности.

Базируясь на анализе факторов, влияющих на припуски предшествующего и выполняемого переходов, профессор В.М. Кован разработал расчетно-аналитический метод определения операционных припусков. Расчетной величиной является минимальный припуск на обработку, который должен обеспечить устранение погрешностей обработки на выполняемом переходе и дефектов поверхностного слоя, полученных на предшествующем переходе.

Различают общий и операционный припуски. Общим припуском на обработку называется слой материала, удаляемый с поверхности исходной заготовки в процессе механической обработки с целью получения готовой детали.

Следует заметить, что назначение чрезмерно больших припусков на заготовку приводит к неоправданно излишнему переводу материала в стружку, к повышенному расходу режущего инструмента, увеличению трудоемкости, потребляемой электроэнергии и рабочей силы.

Малый припуск, наоборот, может не обеспечить удаления дефектного слоя материала и получения требуемой точности и шероховатости обрабатываемых поверхностей, а также появляется опасность возникновения брака из-за наличия черновин.

Операционный припуск – это слой материала, удаляемый с заготовки при выполнении одной технологической операции.

Схема расположения припусков и допусков на обработку вала за четыре операции (точение черновое, точение чистовое, шлифование предварительное и шлифование окончательное) приведена на рис. 1.3.

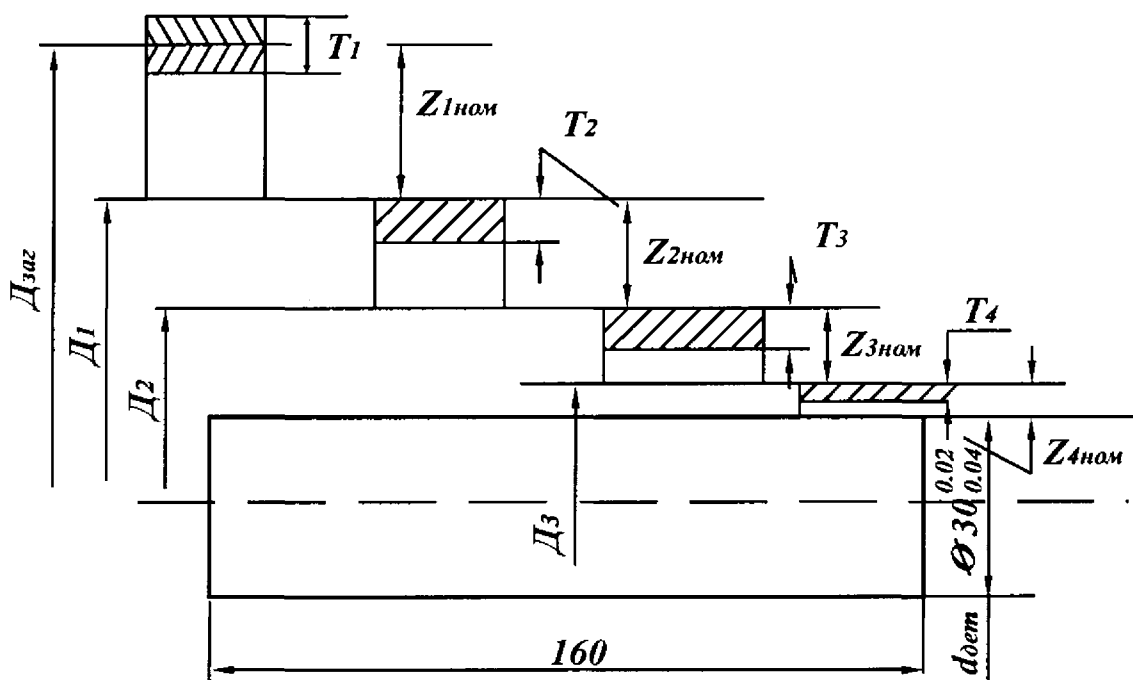


Рис. 1.3. Схема расположения операционных размеров припусков и допусков

Общий номинальный расчетный припуск на обработку $Z_{\text{ном}}$ определяется как разность номинальных размеров исходной заготовки и готовой детали

$$Z_{\text{ном}} = D_{\text{исх. заг.}} - d_{\text{дет.}} \quad (1.1)$$

Он равен сумме номинальных (расчетных) припусков на отдельные операции, т. е.

$$Z_{\text{ном}} = \sum_{i=1}^n Z_{i \text{ ном}}, \quad (1.2)$$

где $Z_{i \text{ ном}}$ – номинальный расчетный припуск на отдельную операцию; n – общее количество операций обработки деталей.

Различают минимальный, номинальный и максимальный припуски.

Минимальный операционный припуск Z_i^{min} – разность наименьшего предельного размера до обработки и наибольшего предельного размера после обработке на данной операции.

Максимальный операционный припуск Z_i^{\max} – разность наибольшего предельного размера до обработки и наименьшего предельного размера после обработки на данной операции. Из схемы рис. 1.3 следует, что максимальный припуск на обработку поверхности определяется формулой

$$Z_i^{\max} = Z_i^{\min} + TD_{i-1} + TD_i, \quad (1.3)$$

где TD_{i-1}, TD_i – допуски на предшествующую и последующую операции.

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

Допуски на операционные размеры принято назначать в тело детали (рис. 1.4).

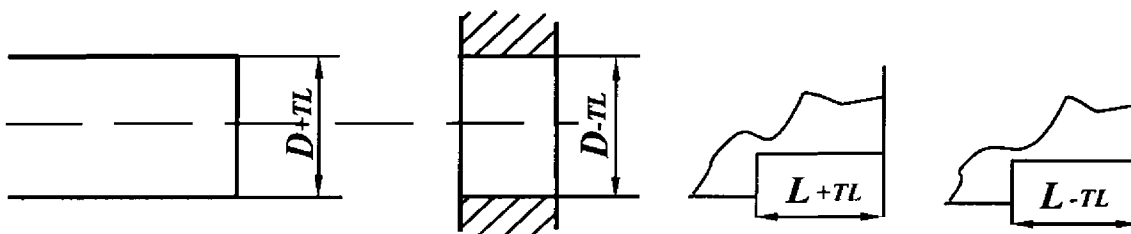


Рис. 1.4. Допуски задаются в тело детали

Минимальный операционный припуск складывается из отдельных элементов, связанных с различными погрешностями, например, для компенсации неровностей, возникающих на предыдущей операции $R_{z_{i-1}}$, дефектного слоя металла h_{i-1} , возникающего в связи с обезуглероживанием, образованием трещин и т.д. (рис. 1.5, а), для компенсации погрешностей формы и пространственных отклонений обрабатываемых поверхностей относительно базовых поверхностей исходной заготовки (рис. 1.5, б) $\Delta_{\Sigma_{i-1}}$ (несоосность, неперпендикулярность торцевых поверхностей к линии центровых отверстий и т. д.), для компенсации погрешностей установки заготовки (рис. 1.5, в) ε_i .

Составляющие погрешностей $\Delta_{\Sigma_{i-1}}$ и ε_i являются векторными величинами, они имеют не только величину, но и направление, поэтому суммируются по правилу квадратного корня.

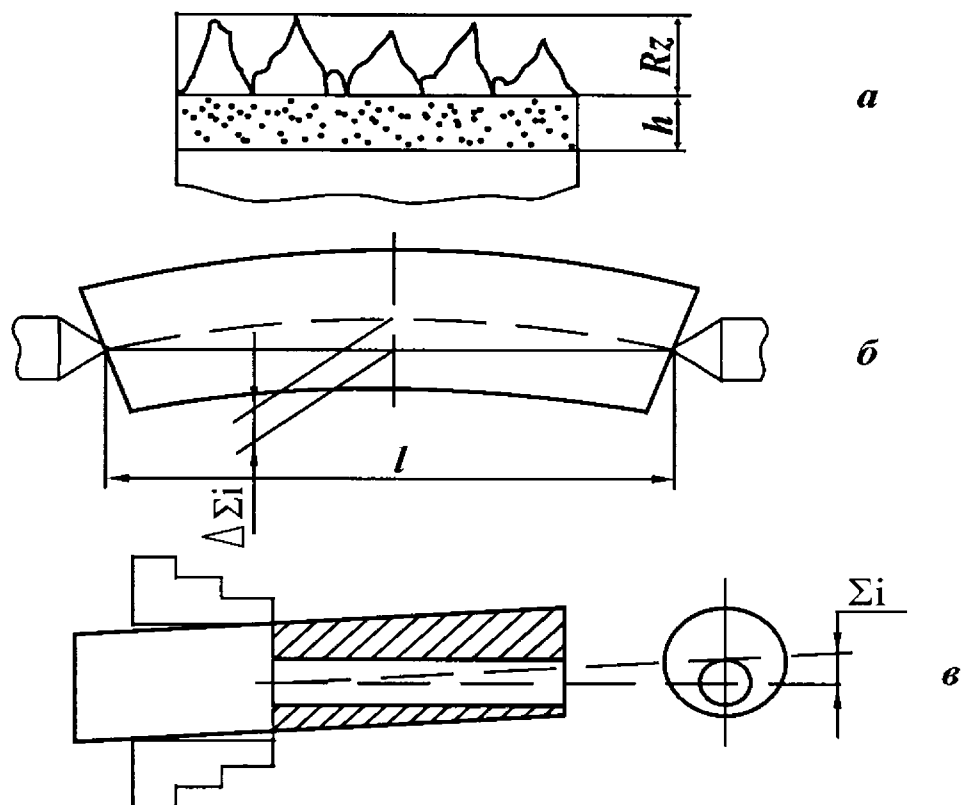


Рис. 1.5. Составляющие элементы операционного процесса

Минимальный операционный припуск при обработке противоположных поверхностей определяется по формуле

$$Z_{i \min} = (R_z + h)_{i-1} + \Delta_{\Sigma_{i-1}} + \varepsilon_i. \quad (1.4)$$

Минимальный двусторонний припуск противоположных поверхностей определяется по формуле

$$2Z_{i \min} = 2[(R_z + h)_{i-1} + \Delta_{\Sigma_{i-1}} + \varepsilon_i]. \quad (1.5)$$

Минимальный двусторонний припуск при обработке наружных цилиндрических поверхностей определяется по формуле

$$2Z_{i \min} = 2[(R_z + h)_{i-1} + \sqrt{\Delta_{\Sigma_{i-1}}^2 + \varepsilon_i^2}]. \quad (1.6)$$

Здесь $R_{z_{i-1}}$ – высота неровностей профиля на предшествующем переходе; h_{i-1} – глубина дефектного поверхностного слоя на предшествующем переходе (обезуглероженный или отбеленный слой);

$\Delta_{\Sigma_{i-1}}$ – суммарные отклонения расположения поверхностей (отклонения от параллельности, соосности, симметричности, пересечения осей и в некоторых случаях отклонения формы поверхностей); ε_i – погрешность установки заготовки на выполняемом переходе.

Пример расчета припусков предельных размеров.

Требуется обработать вал $l = 250$ мм диаметром $30_{-0,04}^{-0,02}(f6)$, заготовка – поковка 16 качества точности.

1. Для расчета номинальных операционных припусков необходимо сначала определить количество операций, необходимых для получения вала шестого качества точности. Допуск на диаметр заготовки поковки $T_{заг} = 2$ мм, допуск на диаметр детали $T_{дет} = 0,02$ мм.

Потребное количество операций определяется по формуле [12]

$$n = \frac{\lg \varepsilon_{общ}}{0,4 \div 0,5}. \quad (1.7)$$

Общее уточнение $\varepsilon_{общ} = \frac{T_{заг}}{T_{дет}} = \frac{2}{0,02} = 100$. После подстановки уточнения в формулу (1.7), получим

$$n = \frac{\lg \varepsilon_{общ}}{0,5} = \frac{2,0}{0,5} = 4.$$

2. Принимаем следующий технологический процесс:

- заготовка – штамповка;
- предварительное черновое обтачивание;
- чистовое обтачивание;
- термообработка (закалка);
- предварительное шлифование;
- чистовое (окончательное) шлифование.

3. Последовательность расчета номинальных операционных припусков.

Расчет начинается с операции чистового шлифования. Номинальный припуск под чистовое шлифование определяется по формуле

$$2Z_H = T_{i-1} + 2(Rz + h)_{i-1} + 2\sqrt{\Delta_{\Sigma_{i-1}}^2 + \varepsilon_i^2}. \quad (1.8)$$

Из таблиц [38] выбираем параметры $Rz_{i-1} = 15$ мкм, $h_{i-1} = 15$ мкм, $2\Delta_{\Sigma_{i-1}} = \Delta_k l = 0,03 \cdot 250 = 15$ мкм, для чистового шлифования $\varepsilon_i = 0$, $T_{i-1} = 40$ мкм.

После подстановки данных в формулу (1.8) получим номинальный припуск под чистовое шлифование

$$2Z_H = 40 + 2(15 + 15) + 15 = 115 \text{ мкм.}$$

Для определения номинального припуска под предварительное шлифование из таблиц [38] выбираем для чистового точения $Rz_{i-1} = 25$ мкм, $h_{i-1} = 25$ мкм, $2\Delta_{\Sigma_{i-1}} = \Delta_k l = 0,072 \cdot 250 = 18$ мкм, допуск $T_{i-1} = 100$ мкм, $\varepsilon_i = 0$.

После подстановки данных в формулу (1.8) получим номинальный припуск под предварительное шлифование

$$2Z_H = 100 + 2(25 + 25) + 18 = 218 \text{ мкм.}$$

Для определения номинального припуска под чистовое точение из таблиц [38] выбираем для предварительного обтачивания $Rz_{i-1} = 50$ мкм, $h_{i-1} = 50$ мкм, $2\Delta_{\Sigma_{i-1}} = \Delta_k l = 0,16 \cdot 250 = 40$ мкм, допуск $T_{i-1} = 390$ мкм, $\varepsilon_i = 0$.

После подстановки данных в формулу (1.8) получим номинальный припуск под чистовое точение

$$2Z_H = 390 + 2(50 + 50) + 40 = 630 \text{ мкм.}$$

Для определения номинального припуска под предварительное обтачивание из таблиц [38] выбираем параметры $Rz_{i-1} = 100$ мкм, $h_{i-1} = 100$ мкм, $2\Delta_{\Sigma_{i-1}} = \Delta_k l = 0,6 \cdot 250 = 150$ мкм, допуск на поковку $T_{i-1} = 2000$ мкм. Для черновой обработки необходимо учитывать погрешности зацентровки $2\Delta_{ц} = 600$ мкм и погрешность установки $2\varepsilon_i = 2 \cdot 150 = 300$ мкм. После подстановки данных в формулу

$$2Z_H = T_{i-1} + 2(Rz + h)_{i-1} + 2\sqrt{\Delta_{\Sigma_{i-1}}^2 + \varepsilon_i^2} + 2\Delta_{ц}$$

получим

$$2Z_H = 2000 + 2(100 + 100) + 335 + 2 \cdot 300 = 3335 \text{ мкм.}$$

Расчетные значения номинальных припусков и предельных размеров вала по технологическому процессу приведены в табл. 1.1.

Т а б л и ц а 1.1

Технологический процесс	Квалитет точности	Допуск T , мкм	Припуск $Z_{\text{н}}$, мкм	D_{max} мм	D_{min} мм
Поковка	16	2000		37,728	35,728
1.Предварительное обтачивание	13	390	3335	30,943	30,553
2.Чистовое обтачивание	10	100	630	30,313	30,213
3.Закалка					
4.Предварительное шлифование	9	40	218	30,095	30,055
5.Окончательное шлифование	6,0	20	115	29,98	29,96

1.5. ВИДЫ ПРОИЗВОДСТВ

Организация производства и характер технологического процесса зависит от количества изготавливаемых машин и трудоемкости их изготовления. Условно виды производства разделяют на единичное, серийное и массовое. Тип производства определяет выбор технологического оборудования, степень механизации и автоматизации производственных процессов.

Для определения типа производства используют коэффициент серийности (коэффициент закрепления операций). Коэффициент K_{30} равен отношению числа различных технологических операций «О», выполняемых в течение месяца, к числу рабочих мест P : $K_{30} = O/P$.

При $K_{30} = 1$ оборудование загружено полностью и переналаживаться не будет. Этому условию соответствует массовое производство.

При $K_{30} > 1$ на станках будут обрабатываться детали нескольких наименований – производство серийное. Ориентировочно о типе производства судят по K_{30} :

K_{30}	Тип производства
1	массовое производство
2...10	крупносерийное производство
10...20	серийное
20...40	мелкосерийное
св 40	единичное производство

Например, на участке 14 станков, из них на 2 станках выполняют по 5 различных операций, на 3 станках выполняют по 4 операции, на 4 станках – по 3 операции и на 5 станках – по 2 операции. Для определения серийности определяют K_{30}

$$K_{30} = \frac{2 \cdot 5 + 3 \cdot 4 + 4 \cdot 3 + 5 \cdot 2}{14} \approx 3.$$

Полученный коэффициент закрепления операций характеризует крупносерийное производство.

Массовое производство характеризуется:

1. Непрерывностью выпуска одних и тех же изделий.
2. Использованием специального оборудования.
3. Применением много-инструментальных наладок.
4. Применением специального режущего и мерительного инструмента.
5. Размещением оборудования по ходу технологического процесса и сложностью наладок станков.
6. Продукция имеет широкое применение (велосипеды, тракторы, автомобили и т. д.).

Для массового производства, кроме большой программы выпуска изделий, нужна еще устойчивость программы.

При массовом производстве частая замена и переналадка оборудования недопустимы, так как затраты на специальные приспособления, мерительные и режущие инструменты относятся к специальным затратам. Эти затраты распределяются на все детали, которые будут обрабатываться за все время эксплуатации специальных станков, приспособлений, режущего и мерительного инструментов. Поэтому, чем устойчивее производство, тем больше специальных средств будет выделено на совершенствование технологии.

В табл. 1.2 представлены диапазоны изменения годовой программы выпуска в различных видах производств.

Т а б л и ц а 1.2

Масса детали, кг	Годовая программа, шт				
	Тип производства				
	единичное	мелкосер.	Серийное	крупносер.	массовое
1,0	10	10 – 2000	1500 – 10000	75000–200000	200000
1,0 – 2,5	10	10 – 1000	1000 – 5000	50000–100000	100000
2,5 – 5,0	10	10 – 500	500 – 3500	3500–7500	7500
5,0 – 10,0	10	10 – 300	300 – 2500	2500–5000	5000
10	10	10 – 200	200 – 1000	1000–2500	2500

Серийное производство. Здесь изготовление осуществляется партиями деталей или сериями изделий, регулярно повторяющихся через определенный промежуток времени. Характерным признаком является выполнение на рабочем месте нескольких периодически повторяющихся операций. Продукция серийного производства – изделия установившегося типа (станки, краны, гидротурбины). Номенклатура изделий подбирается близкой по габаритам, размерам, конфигурации (валы, корпуса, зубчатые колеса), по материалам (сталь, алюминий, чугун).

Партия – это определенное количество деталей, запускаемых в обработку одновременно.

Размер партии (серии) определяется по формуле $n = \frac{Na}{\Phi_q}$,

где n – количество деталей в партии, шт; N – годовая программа выпуска, шт; a – число рабочих дней, на которое разрешается иметь незавершенное производство; Φ_q – годовой фонд рабочего времени.

Крупносерийное производство $a = 4 \div 6$.

Серийное производство $a = 6 \div 10$.

Серийное производство характеризуется:

1. Периодической повторяемостью партий.
2. Применением универсального и частично специального оборудования.
3. Применением универсальных специальных приспособлений.

4. Применением заготовок из проката, отливок в кокиль и в землю.

Единичное производство. Здесь изготавливаемые изделия либо не повторяются, либо повторяются, но через неопределенный промежуток времени. На рабочих местах выполняются разнообразные операции. Продукция не имеет широкого применения. По такой форме организации труда работают заводы тяжелого машиностроения, судостроительные верфи, предприятия, выпускающие специальное оборудование для химических и металлургических заводов, в опытных и ремонтных цехах и т. д.

В единичном производстве размещение оборудования производится по группам. Например, участок токарных станков, участок фрезерных или зубошлифовальных станков, участок расточных прецизионных станков или станков с ЧПУ.

Технологический менеджмент в производственных системах.

Особенностью современного этапа развития машиностроения является острая конкурентная борьба на мировом рынке между заводами за продвижение своей продукции. Для коммерческого успеха машиностроительные предприятия должны выпускать такую продукцию, которая по своим потребительским свойствам соответствовала бы спросу на рынке. Кроме того, выпускаемая продукция должна иметь минимальную стоимость, требуемое качество, высокую надежность, удобство в эксплуатации и ремонте. Выпуск такой конкурентоспособной продукции в условиях непрерывно возрастающих к ней требований, является сложной задачей, охватывающей этапы организации, планирования и изготовления.

Одной из форм принципиально новой организации машиностроительного производства, позволяющей решить проблему выпуска конкурентоспособной продукции, является создание гибких производственных систем (ГПС). В рамках этого направления известны интегрированная компьютерная система конструкторской подготовки производства и интегрированные производственные и технологические системы. В интегрированных технологических системах для реализации поставленной задачи привлекаются теория конструирования, различные модули курса технологии машиностроения, организация (менеджмент) и экономика производства. При таком системном подходе к проектированию и изготовлению изделий на входе в систему задаются исходные данные, которые в дальнейшем на протяжении всего производственного процесса многократно используются

согласно разработанному алгоритму функционирования производственной системы до тех пор, пока не будут получены приемлемые конечные результаты, определенные в техническом задании на изготовление.

Интегрированные технологические и производственные системы должны охватывать не только этапы проектирования и изготовления изделий, но и этапы подготовки производства. Для разработки таких систем нужен принципиально новый подход к решению данной проблемы путем многоэтапного приближения к цели, включающей все этапы жизненного цикла изделия. Такой подход к проектированию требует установления связей точности обработки и качества поверхностного слоя с производительностью и себестоимостью на самом раннем этапе жизненного цикла (маркетинговые исследования), чтобы своевременно принять принципиальное решение о необходимости внесения соответствующих изменений в техническом задании.

Информационная модель позволяет принимать решения на основе реализации любого этапа технологического процесса. При этом возможны два варианта условий изготовления изделий: для вновь организуемого производства (перспективный технологический процесс) и для действующего производства (рабочий технологический процесс).

В действующем производстве информационная модель уже известна. Она включает в виде отдельных модулей необходимые подсистемы, например, последовательность этапов обработки, обеспечивающих требуемую точность и качество изготовления, методику размерного анализа, распределение припусков по переходам, обеспечивающих устранение шлифовочных дефектов, расчет режимов резания, нормирование технологического процесса, расчет производственного персонала, издержек производства, себестоимости продукции и т. д.

В случае изменения параметров или номенклатуры выпускаемых изделий изменяются исходные данные на входе информационной модели. Производится оценка изменения себестоимости выпускаемой продукции. Для пояснения методологии разработки компьютерной технологии, основанной на использовании принципов общей теории управления (технологического менеджмента) рассмотрим схему, приведенную на рис. 1.6 [66].

На 1-м этапе производится подготовка и изучение исходных данных на основе следующей информации: конструкция детали, све-

дения о заготовке и способе ее получения, организационно-технические факторы.

На 2-м этапе разрабатывается общий маршрут (или несколько маршрутов) обработки детали. Производится выбор и обоснование технологических баз, определяются операционные припуски и допуски, производится распределение припуска по переходам, разрабатываются оптимальные варианты технологических процессов, обработки отдельных поверхностей, например, операции шлифования зубчатых колес, шлифования резьбы прецизионных ходовых винтов и т. д. Здесь же осуществляется выбор средств технологического оснащения исходя из производственных условий предприятия или возможностей их приобретения на стороне.

На 3-м этапе осуществляется предварительный отбор приемлемых технических решений, например, производится оценка принятого варианта изготовления заготовки; оценивается стабильность обеспечения точности на каждой операции; оценивается целесообразность автоматизации операций и возможность приобретения специальных станков, приспособлений, режущего и мерительного инструмента и другой технологической оснастки в заданные сроки подготовки производства; оценивается удобство размещения оборудования на производственных площадях и целесообразность автоматизации транспортирования деталей, удаления стружки, многостаночного обслуживания.

На 4-м этапе производится размерный анализ технологического процесса. Здесь осуществляется количественная оценка параметров технологического процесса и производится корректировка предложенных вариантов с повторной логической оценкой выявленных расхождений. Возможны два варианта обратных связей: линия *B* (возврат к этапу 2) и линия *C* (возврат к исходному заданию), например, при необходимости дополнительной отработки конструкции детали на технологичность.

На 5-м этапе на основании оценки альтернативных вариантов технологических процессов по критериям эффективности выбирается оптимальный вариант.

На 6-м этапе производится оптимизация режимов резания, определяется норма времени на выполняемые операции, разрабатываются управляющие программы и производится оформление технологического процесса на операционных картах.

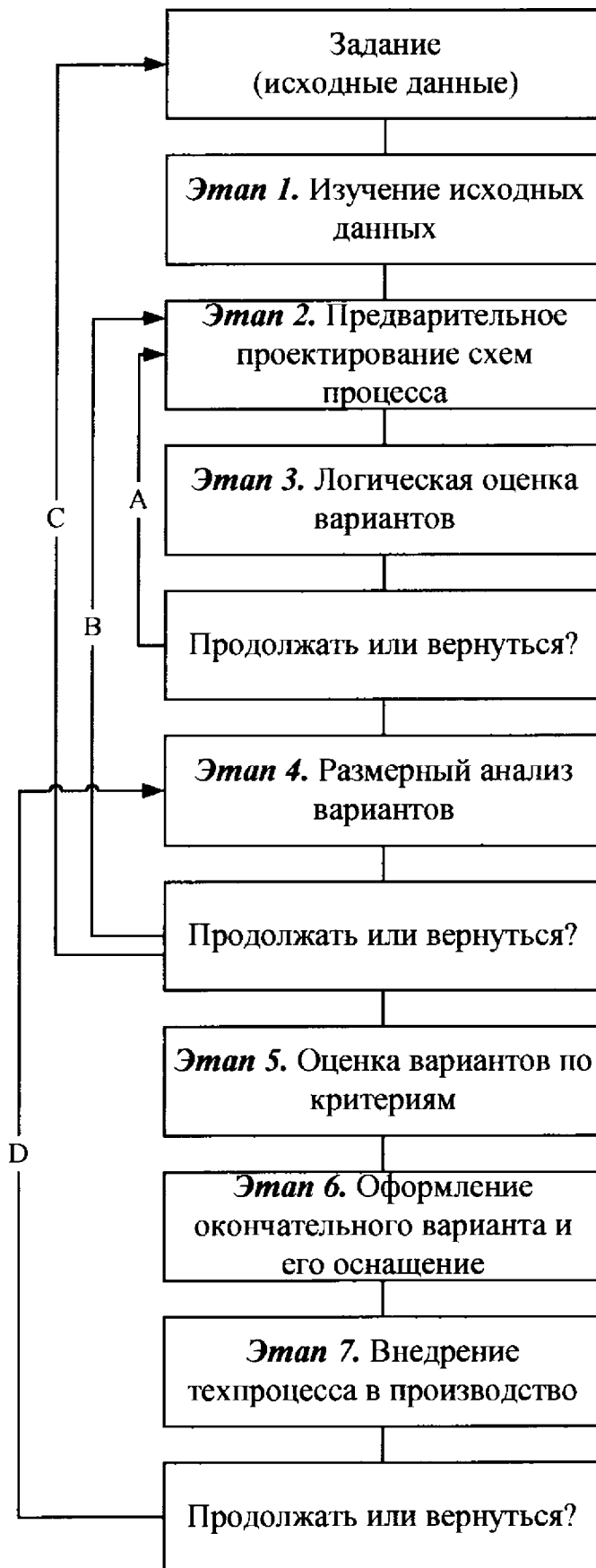


Рис. 1.6. Схема компьютерной технологии, основанной на использовании принципов общей теории управления (технологического менеджмента)

На 7-м этапе осуществляется внедрение разработанного варианта технологического процесса. На этом этапе выявляется несоответствие расчетных технологических параметров фактическим. Например, фактическая жесткость станков отличается от нормативной, которая на этапе технологической подготовки выбиралась из справочника технолога-машиностроителя.

При существенном несоответствии расчетных и фактических параметров необходимо возвратиться из этапа 7 к этапу 4 (локальная обратная связь *D*), а из 4-го этапа можно вернуться на более ранние этапы (обратные связи *B* и *C*). При незначительном несоответствии необходимо стабилизировать точность и качество поверхностного слоя с помощью систем адаптивного или интеллектуального управления. В этом случае нет необходимости возвращаться к этапу технологической подготовки производства.

Из анализа схемы принятия технологических решений (рис. 1.6) вытекают следующие особенности:

1. Многовариантность технологического проектирования с качественной и количественной оценкой вариантов.
2. Структурная и параметрическая оптимизация за счет многократных интеграционных процедур (обратные связи *A*, *B*, *C* и *D*).
3. Условность границы между этапами 6 и 7, т. е. между технологической подготовкой производства и самим производством.

Таким образом, этапы подготовки и реализации производства являются этапами предварительного и окончательного управления технологическим процессом.

На этапе подготовки решаются задачи определения структуры и параметров процесса, обеспечивающие максимальную производительность или минимальную себестоимость обработки с учетом требований по точности и качеству поверхностного слоя. На этапе обработки решаются задачи стабилизации параметров процесса изготовления деталей с учетом индивидуальных особенностей элементов упругой технологической системы станок–приспособление, инструмент – деталь. Для описания методологии разработки интегрированных и гибких производственных и технологических систем нужны информационные (в том числе математические) модели принятия решений в структуре и параметрах проектируемых технологических процессов. Этим вопросам посвящены все последующие главы настоящего учебника.

1.6. ОБЪЕКТ ПРОИЗВОДСТВА МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО ЗАВОДА

Объектом производства машиностроительного завода является машина.

Машина – это сочетание механизмов, узлов и деталей, осуществляющих работу или преобразующих виды энергии. В зависимости от назначения различают машины-двигатели, преобразующие один вид энергии в другой, и рабочие машины, осуществляющие в процессе производства изменение размеров, формы и физико-механических свойств деталей. Продукты производства, подлежащие изготовлению, называются изделиями.

Узел – это часть изделия, который собирается отдельно и в дальнейшем участвует в процессе сборки как самостоятельная сборочная единица.

Сборочные единицы (узлы), которые в процессе общей сборки непосредственно входят в изделие, называются сборочными единицами первого порядка. Сборочные единицы, которые в процессе сборки входят непосредственно не в изделие, а в узел, называются сборочными единицами второго порядка. Например, автомобиль является изделием завода. Мотор непосредственно входит в изделие. Он является сборочной единицей первого порядка. Мотор состоит из двух самостоятельных узлов: двигателя и коробки скоростей. Эти самостоятельные узлы являются сборочными единицами второго порядка. Двигатель также содержит ряд самостоятельных узлов, например, шатунно-поршневую группу. Этот самостоятельный узел является сборочной единицей третьего порядка. Каждая сборочная единица включает в себя определенные виды соединений и деталей. По возможности относительного их перемещения соединения подразделяются на подвижные и неподвижные. Соединения в свою очередь подразделяются на разъемные и неразъемные.

Например, к числу неподвижных разъемных соединений можно отнести резьбовые соединения, пазовые, конические, а к числу неразъемных неподвижных соединений – заклепочные, пресовые и полученные путем развальцовки. К подвижным разъемным соединениям относятся: плунжеры, зубчатые пары, подшипники скольжения, каретки станин и т. д., а к подвижным неразъемным соединениям – подшипники качения, запорные клапаны и др. Количество разъемных

соединений в современных узлах составляет 65 – 85% от общего числа соединений.

По форме сопрягаемых поверхностей соединения подразделяются на: цилиндрические (до 35 – 40%), плоские (15 – 20%), комбинированные (15 – 20%), конические (6 – 7%), сферические (2 – 3%) и винтовые. По методу образования соединений они подразделяются на резьбовые, клиновые, шпоночные, штифтовые, шлицевые, сварные, паяные, клепаные, прессовые.

Важнейшей характеристикой современных машин является их качество.

Под качеством продукции понимается совокупность свойств, обуславливающих пригодность ее удовлетворять требованиям в соответствии с ее назначением. Качество каждой машины характеризуется определенной системой показателей, регламентирующих степень совершенства машины. К числу этих показателей следует отнести производительность, экономичность, степень автоматизации, КПД и ряд других показателей, определяющих общий технический уровень машины. Изготовление машин и приборов требует четкой организации всего производственного процесса, тщательной технологической подготовки производства.

Технологическая подготовка производства включает в себя:

1. Конструкторскую подготовку производства (разработку конструкции изделия и создание чертежей).

2. Технологическую подготовку производства (разработку технологической документации, изготовление средств технологического оснащения, управление процессом технологической подготовки производства).

3. Календарное планирование производственного процесса изготовления изделия в установленные сроки, в необходимых объемах выпуска и затратах.

Особенностью современных машиностроительных предприятий является их территориальная распределенность. При этом цельность структуры производства обеспечивается на основе высококачественной компьютерной системы связи и информации, обеспечивающей эффективное управление производственным процессом.

Структура эта часто изменяется: происходит слияние и разделение предприятий, их переориентация на выпуск новых машин. Причем, существующие границы между государствами оказывают на эти

процессы лишь условное влияние. Рентабельность и коммерческая выгода в условиях ожесточенной конкурентной борьбы являются здесь главным побудительным стимулом развития производства. Традиционные требования относительно наименьших затрат труда и минимальной себестоимости изделия в новых условиях должны конкретизироваться в конкретные количественные показатели, которые необходимо обеспечить. Например, заранее оговаривается верхний уровень цены изделия и, соответственно, его себестоимость. В этих условиях становится объективной необходимостью разработка не просто одного из возможных технологических процессов, а такой технологический процесс, который обеспечивал бы наперед заданные затраты. Следовательно, при проектировании технологического процесса надо решать обратную задачу. В этой связи актуальными становятся компьютерные технологии решения обратных задач технологического проектирования на этапе подготовки производства. При запуске изделия в производство общая задача управления решается с учетом календарного планирования и диспетчирования, т. е. с учетом производственной обстановки, но на той же самой производственной основе – общей теории управления.

1.7. ВИДЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

По уровню унификации технологические процессы разделяются на: единичный, типовой и групповой.

Единичный технологический процесс применяется для изготовления изделий одного наименования, одного типоразмера и применяется во всех типах производства.

Типовой – характеризуется единством содержания и последовательности операций и переходов для группы изделий с общими конструктивными признаками.

Групповой – характеризуется общностью оборудования и оснастки при изготовлении отдельных деталей или при изготовлении группы изделий.

1.7.1. Типизация технологических процессов

Типизация предусматривает разработку типовых технологических процессов для группы деталей, имеющих сходство: служебного

назначения; конструктивных форм и размеров; используемых материалов и в последовательности обработки основных поверхностей. В основе ее лежит общее соображение о том, что затраты на проектирование могут быть тем больше, чем большее количество деталей будет изготавливаться по данному типовому технологическому процессу. Впервые эту идею предложил профессор А.П. Соколовский.

В основу построения технологической классификации заготовок А.П. Соколовский принимал классы, которые, в свою очередь подразделяются на подклассы и группы.

В основу классификации заложены признаки:

- 1) форма и размеры деталей;
- 2) шероховатость обрабатываемой поверхности;
- 3) обрабатываемый материал.

По классификации А.П. Соколовского предусмотрено 14 классов: валы, втулки, диски, эксцентриковые заготовки, крестовины, рычаги, плиты, угольники, бабки, зубчатые колеса, фасонные кулачки, ходовые винты, червяки и крепежные детали. Разбивка классов на группы и подгруппы заканчивается типом.

Под типом подразумевается совокупность заготовок одного класса имеющих одинаковый маршрут типовых операций.

Типовые технологические процессы разрабатываются в двух вариантах: рабочего, составленного на основании имеющегося оборудования в условиях завода, и перспективного, учитывающего все возможности современных видов обработки, включая станки с ЧПУ, обрабатывающие центры, гибкие производственные системы и прогрессивные методы организации производства.

Типизация технологических процессов может производиться по трем направлениям:

- 1) обработка отдельных поверхностей;
- 2) обработка отдельных (типовых) сочетаний поверхностей;
- 3) обработка заготовок.

Под типовым сочетанием поверхностей понимается такое сочетание, при котором у различных заготовок поверхности обрабатываются от постоянной технологической базы на одних станках, одинаковыми инструментами с определенной последовательностью операций, установов и переходов. Признаками для классификации типовых сочетаний поверхностей являются: взаимное расположение поверхностей; точность взаимного их расположения; формы и размеры отдельных поверхностей и материал обрабатываемой заготовки.

Документация типовых технологических процессов включает в себя классификатор заготовок и типовые процессы обработки. Для каждого типа заготовок составляются карты. Они имеют две разновидности: обычные типовые карты, которые включают перечень операций и оборудования и последовательность выполнения работ, и карты, имеющие форму слепышей. В этих картах размеры не проставляются. Синьки снятые с этих калек служат бланками для оформления операционных карт. В них производится простановка конкретных размеров.

1.7.2. Групповой технологический процесс

Групповым технологическим процессом называется совокупность групповых операций, обеспечивающих обработку группы заготовок по общему технологическому маршруту.

Сущность групповой технологии заключается в том, что применяемое оборудование, оснастка, вопросы организации производства рассматриваются не отдельно для какой-то конкретной детали, а для совокупности деталей называемых группой.

Основным признаком для объединения заготовок в группы по отдельным технологическим операциям является общность обрабатываемых поверхностей или их сочетаний. Например, детали, с различной конфигурацией (рис. 1.7), но имеющие цилиндрические наружные, внутренние и конические поверхности, фаски, резьбы, канавки, торцовые поверхности и т. д., которые обрабатываются на одном и том же оборудовании, в однотипных групповых переналаживаемых приспособлениях, составляют группу.

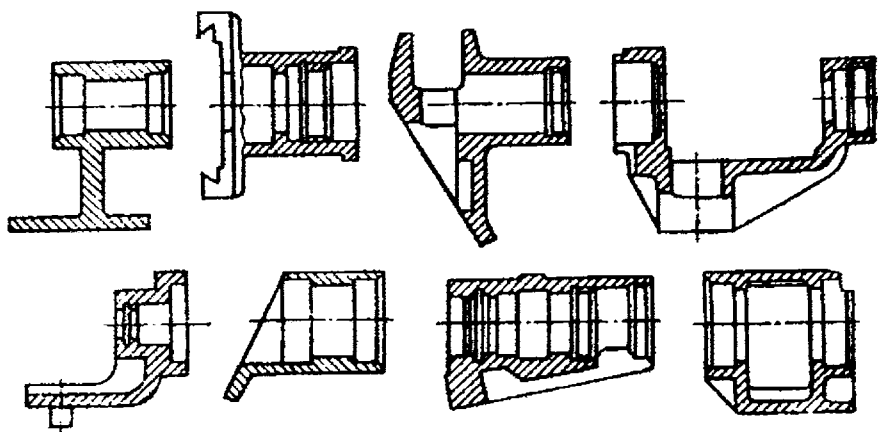


Рис. 1.7. Группа заготовок, обрабатываемых с одной наладки

Данная группа деталей допускает при переходе от одной заготовки к другой незначительную переналадку станка, например, замену сверл, переустановку линейных и диаметральных упоров, замену сменных установочных или зажимных деталей группового приспособления при сохранении на станке основного корпуса приспособления.

Групповой технологический процесс выполняется в следующей последовательности:

1. Производится отбор заготовок, которые могут быть обработаны на однотипном оборудовании и переналаживаемых приспособлениях.

2. После уточнения состава группы создают комплексную деталь, устанавливают последовательность и содержание переходов групповой операции и разрабатывают схему групповой наладки станка. Схему групповой наладки станка разрабатывают на комплексную деталь, которая включает в себя все поверхности, встречающиеся у остальных заготовок.

3. Определяется фактическая трудоемкость обработки заготовок в количестве, обеспечивающем полное выполнение месячной программы, с учетом периодичности запуска заготовок в производство.

4. Устанавливается окончательный состав группы заготовок, исходя из необходимости загрузки оборудования в течении месяца при минимальном количестве переналадок для других групп заготовок.

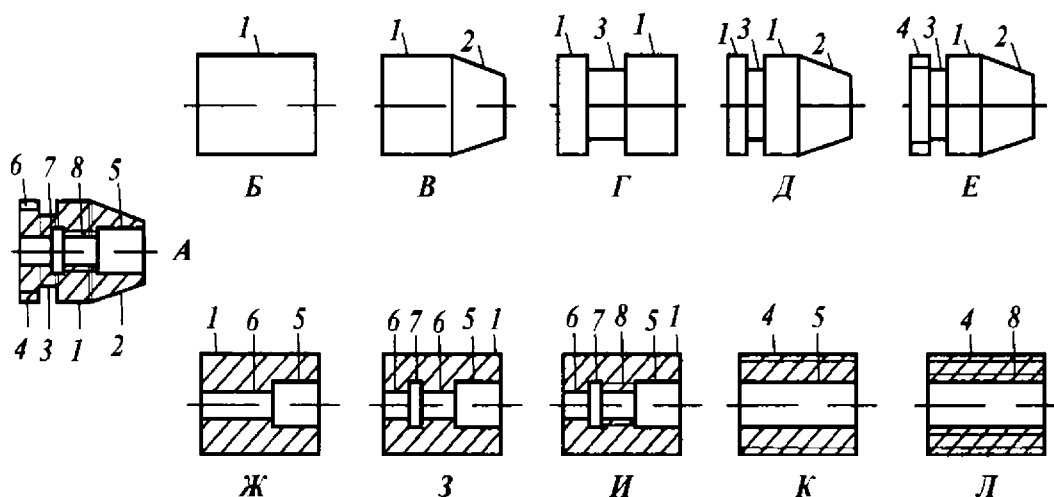


Рис. 1.8. Схема, поясняющая роль комплексной детали

Преимущества групповой обработки проявляются в полной мере только в том случае, если между переналадками станка для обработки различных групп заготовок проходит достаточно большой промежуток времени (три – четыре дня и более).

Групповые операции с успехом применяют для заготовок, цикл изготовления которых ограничивается одной операцией. Например, обработка на прутковых автоматах или на револьверных станках.

На рис. 1.8 приведена схема создания комплексной детали путем искусственного объединения отдельных поверхностей более простых заготовок группы.

Каждая из 10 изображенных деталей может быть изготовлена из прутка в одну операцию на револьверном станке. Если заданная точность всех поверхностей, помеченных цифрами, одинакова, то план обработки комплексной детали может служить планом обработки для любой из остальных 10 деталей (с пропуском ненужных переходов).

1.7.3. Общие принципы построения единичных технологических процессов

Построение единичных технологических процессов осуществляется по принципу концентрации или дифференциации операций и переходов.

Концентрацией (укрупнением) называют объединение простых технологических операций в более сложную. Концентрация операций применяется во всех типах производства. В массовом производстве для этой цели применяют многошпиндельные агрегатные станки. В серийном – токарно-револьверную обработку. В единичном – на универсальных станках концентрируют максимальное количество переходов.

Достоинство метода – высокая точность, так как при концентрации операций сокращается до минимума число переустановок деталей, и высокая производительность.

Дифференциацией операции называют разделение операции на переходы. Здесь увеличивается количество переустановок, что снижает точность обработки. Разделяются черновая и чистовая операции. Работа ведется на операционных станках рабочими низкой квалификации. Метод применяется на заводах массового производства при обработке мелких деталей.

Для разработки единичных технологических процессов необходимо иметь следующие исходные данные: сборочный чертеж изделия и описание его конструкции; рабочие чертежи деталей и технические условия на изготовление; программу выпуска.

Для действующих предприятий необходимы дополнительные сведения: техническое состояние оборудования в цехе и его загрузка; сведения о производственных площадях; производственные возможности инструментального, литейного и кузнечного цехов.

Работа над проектом начинается с анализа рабочего чертежа и технических условий.

Материал, размеры и форма детали определяют способ получения заготовки. Становится ясным объем механической обработки и типаж станков.

Заданная термическая обработка позволяет разделить технологический процесс на этапы: черновой, чистовой, отделочный.

Указанная в чертеже точность размеров позволяет определить количество необходимых переходов. Например, заготовка штамповка имеет 16-й квалитет точности. Допуск на размер колеблется в пределах 1,5 – 2,0 мм. Требуется получить размер с допуском 0,02 мм.

Количество требуемых переходов определяется по формуле

$$k_j = \lg \varepsilon_0 / 0,5$$

где ε_0 – общее уточнение $\varepsilon_0 = TL_{заг} / TL_{дет}$;

$TL_{заг}$ – допуск на размер L заготовки; $TL_{дет}$ – допуск на размер L детали.

Взаимная координация поверхностей на чертеже определяет: выбор установочных и измерительных баз; способ установки; последовательность операций и необходимость перерасчета размерных цепей. В связи с этим к чертежу предъявляются следующие требования:

1. Чертеж должен быть проработан так, чтобы все размеры имели допуски. Свободные размеры считаются свободными из-за чисто графических удобств. Они оговариваются в технических условиях.

2. Допусками должны быть защищены: механические свойства материала, глубины покрытий, цементации, азотирования, хромирования и т. д.

3. Количество размеров на чертеже должно быть достаточно для изготовления и контроля.

4. Размерная цепь на чертеже не должна быть замкнута.

5. На чертеже детали должны обязательно проставляться размеры, входящие в сборочные размерные цепи. На рис. 1.9 показаны разрез узла редуктора и сборочная размерная цепь.

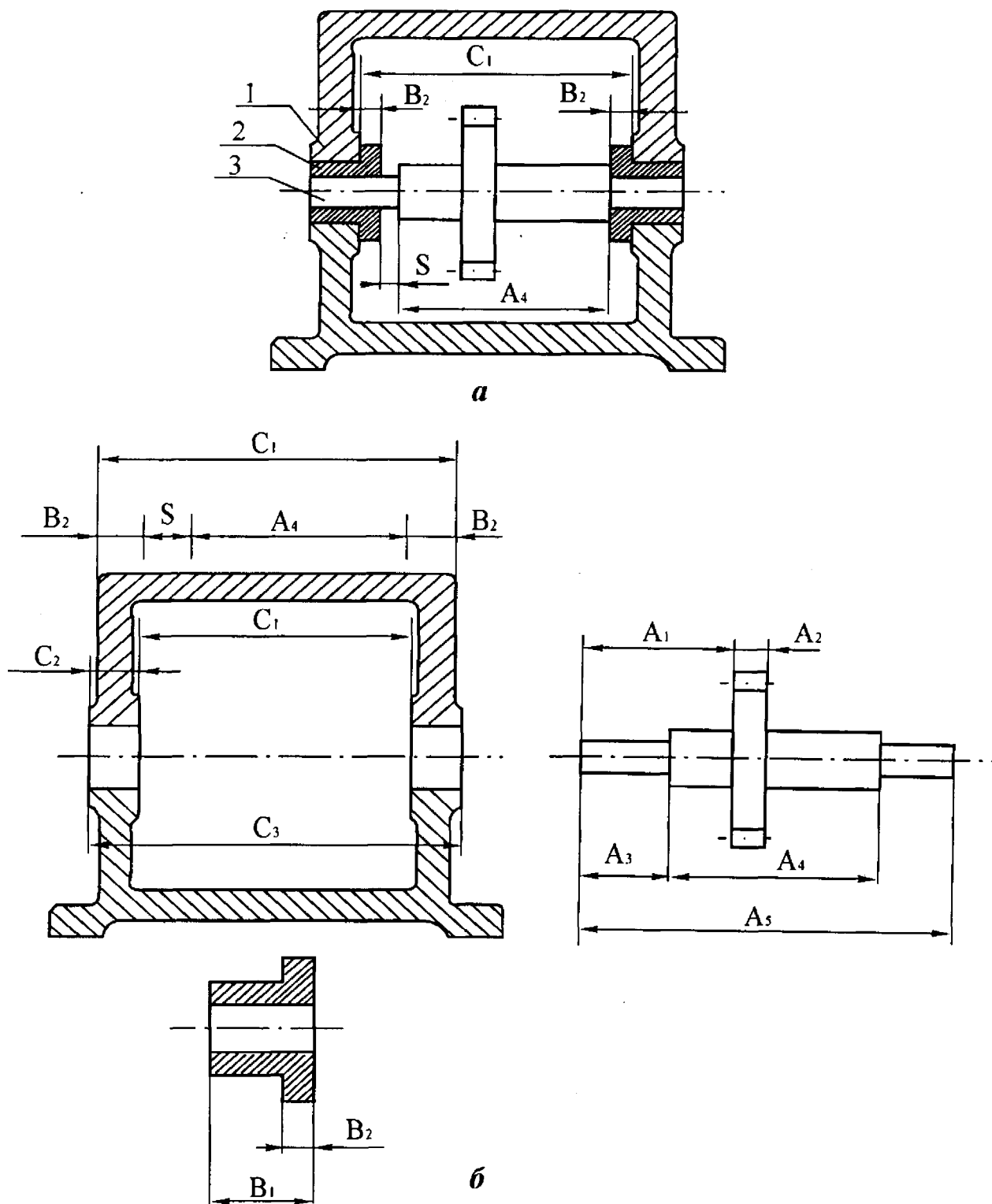


Рис. 1.9. Разрез редуктора и чертеж деталей, входящих в узел

Нормальные условия узла зависят от зазора между торцами вала 3 и торцами втулок 2.

Можно по разному проставлять размеры на чертеже деталей, входящих в сборочную размерную цепь, но размер A_4 на валу должен быть обязательно поставлен. На чертеже втулки должен обязательно поставлен размер буртика B_2 , а на чертеже корпуса должен быть размер между торцами C_1 (рис. 1.9, б). При такой простановке размеров допуск замыкающего звена (зазора) определяется

$$TS = TA_4 + TC_1 + TB_2 + TB_2.$$

Однако такая простановка размеров, обеспечивающая кратчайшую размерную цепь, не в полной мере обеспечивает условия, предъявляемые технологией изготовления. Например, обработка вала на станках с ЧПУ требует координатной простановки размеров от торцов 1 и 2 (рис. 1.10, б). Обработка производится в следующей последовательности:

- подрезка-торцовка и зацентровка на фрезерно-центровальном станке;
- обработка диаметров вала со стороны торца 2 на длину A_6 и A_7 ;
- обработка диаметров вала со стороны торца 1 на длину A_1 и A_3 .

При обработке втулки на токарном автомате настройка резцов производится относительно торца упора, ограничивающего выдвижение прутка (рис. 1.10, в). Втулка обрабатывается в такой последовательности:

- сверление отверстия;
- развертывание отверстия;
- обтачивание наружного диаметра;
- черновое обтачивание посадочного диаметра втулки;
- чистовое обтачивание посадочного диаметра втулки;
- отрезка.

При такой схеме обработки размеры проставляются от настроечной базы, т. е. от торца малого диаметра втулки.

Растачивание отверстия в корпусе и подрезка торцов производится на расточных станках с ЧПУ с использованием поворотного

стола. При данной схеме обработки обеспечиваются размеры C_2 , C_3 , C_4 (рис. 1.10, а).

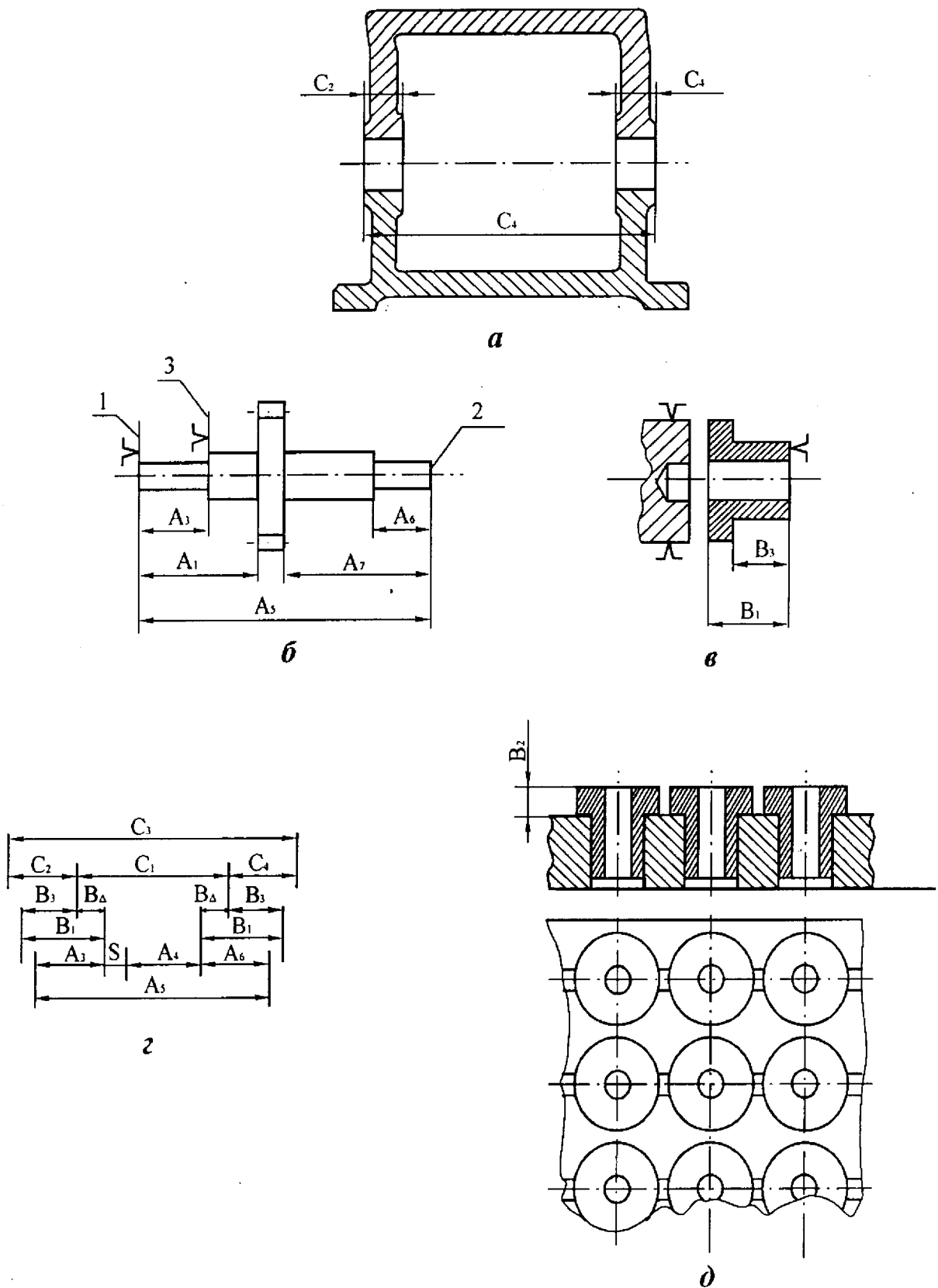


Рис. 1.10. Чертежи деталей (а-в), размерная цепь (г) и наладка на операцию плоского шлифования торцов втулок (д)

С учетом рациональной технологии обработки деталей, входящих в данный узел, размерная цепь для определения замыкающего звена S будет состоять не из 4-х звеньев, а из 10 звеньев (рис.1.10, z).

Следовательно, для обеспечения точности замыкающего звена в пределах заданного допуска необходимо произвести ужесточение всех десяти составляющих звеньев

$$TS=TA_3 + TA_5 + TA_6 + 2TB_1 + 2TB_3 + TC_3 + TC_2 + TC_4.$$

Ужесточение допусков на технологические размеры при обработке деталей на станках с ЧПУ вызывает резкое увеличение себестоимости.

Заметим, что на автоматических станках реализовать обработку с такими ужесточенными допусками практически невозможно.

Чтобы удовлетворить требования конструктора с минимальными затратами необходимо провести следующие мероприятия.

Втулка обрабатывается на автомате с экономически приемлемыми допусками на размеры B_3 и B_1 (рис. 1.10, $в$), но после обработки производится шлифование торца втулки (рис. 1.10, $д$) на многоместном приспособлении.

Для обеспечения размера A_4 на валу при обработке необходимо изменить способ базирования. В качестве установочной базы выбрать торец 3.

Для обеспечения размера C_1 надо ввести дополнительную операцию – подрезку торцов двумя раздвижными резцами.

Для каждой детали существует строго определенное количество размеров, определяющих ее полную размерную характеристику. Можно по-разному изменять простановку размеров, однако необходимое их число для конкретной детали всегда остается постоянным

Размеры, определяющие геометрические параметры детали, могут быть трех видов: размеры первого вида образуют систему размеров исходной заготовки, размеры второго вида – систему размеров обработанной детали, размеры третьего вида – координируют одну систему относительно другой.

Системы размеров необрабатываемых и обрабатываемых поверхностей должны быть связаны только одним размером по каждой из координатных осей.

Г Л А В А 2

ТОЧНОСТЬ ОБРАБОТКИ

2.1. ОБЩИЙ ПОДХОД К АНАЛИЗУ ТОЧНОСТИ ОБРАБОТКИ

Современные машины представляют собой сложные механические системы, состоящие из большого количества узлов и деталей. Для нормального функционирования машины каждая деталь должна быть изготовлена в соответствии с требованиями чертежа. Должна быть обеспечена требуемая точность размеров, геометрической формы, взаимного расположения поверхностей и требуемая шероховатость и физико-механические свойства поверхностного слоя.

При невыполнении требований чертежа возникают проблемы при сборке машины и при ее эксплуатации. Возникают повышенный износ трущихся поверхностей и преждевременное разрушение деталей.

Обеспечение точности обработки является чрезвычайно важной задачей. Абсолютную точность обработки обеспечить нельзя. Требуемую точность размеров можно получить лишь с определенной степенью приближения в пределах заданного поля допуска.

При решении проблемы точности в машиностроении технолог должен обеспечить заданную конструктором точность деталей при одновременном достижении высокой производительности и экономичности их изготовления. Для этой цели технолог должен исследовать возможность получения требуемой точности, проанализировать причины возникновения погрешностей, обосновать и подобрать средства измерения фактической точности обработки и сборки, установить допуски технологических межоперационных размеров.

Под точностью детали понимается ее соответствие требованиям чертежа: по размерам, геометрической форме, правильности взаимного расположения обрабатываемых поверхностей и по степени их шероховатости. Степень приближения размеров, полученных при об-

работке, к размерам, указанным на чертеже, характеризует погрешность обработки. Погрешности обработки обусловлены действием большого числа различных независимых факторов: податливостью элементов технологической упругой системы, износом режущего инструмента, температурными деформациями узлов станка и инструмента, погрешностями кинематической цепи, отклонением траектории движения инструмента от заданной и др. Результирующая погрешность от действия независимых факторов равна сумме составляющих погрешностей. В процессе обработки партии деталей на настроенных станках их размеры изменяются в пределах заданного допуска. Рассеяние размеров вызывается совокупностью действия многих случайных факторов, не поддающихся точному предварительному определению и проявляющих свое действие одновременно и независимо друг от друга.

Погрешности обработки, которые для различных заготовок рассматриваемой цепи имеют различное значение, причем их появление не подчиняется видимой закономерности, называются случайными погрешностями. Следует заметить, что при различных условиях обработки заготовок рассеяние случайных величин размеров может быть описано математическими законами теории вероятности.

В технологии машиностроения практическое применение получили следующие законы: нормального распределения (закон Гаусса), равнобедренного треугольника (закон Симпсона), эксцентриситета (закон Релея), закон равной вероятности и функции распределения, представляющие композицию этих законов.

Известное положение теории вероятности гласит о том, что распределение суммы большого числа независимых случайных слагаемых величин (при небольшом отличии влияния каждой из них на общую сумму и при отсутствии влияния доминирующих факторов) подчиняется закону нормального распределения Гаусса.

Результирующая погрешность обработки обычно формируется в результате одновременного действия большого числа факторов, вызывающих появление погрешностей, зависящих от станка, приспособления, инструмента, заготовки, влияние каждой из которых на результирующую погрешность имеет один порядок. Следовательно, основываясь на известном положении теории вероятности, можно утверждать, что распределение действительных размеров обрабатываемых заготовок подчиняется нормальному закону распределения. Кроме случайных погрешностей в процессе изготовления деталей возни-

кают систематические погрешности. Систематические погрешности для всех заготовок рассматриваемой партии остаются постоянными. Причинами возникновения систематических погрешностей обработки заготовок являются: износ и деформация элементов станков, приспособлений и инструментов; деформация изготавливаемых заготовок; тепловые погрешности, а также погрешности базирования заготовок.

2.2. ВЛИЯНИЕ ИЗНОСА РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА НА ТОЧНОСТЬ ОБРАБОТКИ

Износ мерного режущего инструмента типа разверток, зенкеров, протяжек, кольцевых шпоночных фрез, сверл и фасонного инструмента непосредственно переносится на обрабатываемую заготовку в виде систематической погрешности формы и диаметральных обрабатываемых поверхностей. Износ режущего инструмента при работе на станках, настроенных на размер, приводит к возникновению переменной систематической погрешности обработки.

В соответствии с общими закономерностями износа при трении,

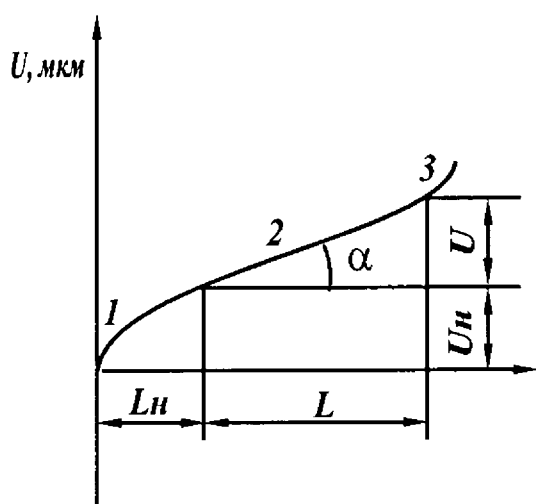


Рис. 2.1. Зависимость износа инструмента u от длины пути резания

скольжении в начальный период износа режущего лезвия инструмента (рис. 2.1) происходит приработка. Продолжительность начального износа L_n и его величина U_n зависят от материала режущего инструмента и обрабатываемой детали, качества заточки и доводки инструмента, а также режимов резания. Обычно продолжительность начального износа, выраженная длиной пути резания L_n , находится в пределах 500 – 2000 м. Первое число соответствует

тщательно доведенным режущим инструментам, второе – заточенным инструментам.

Второй период износа (участок 2) характеризует период нормального износа инструмента, изменяющийся пропорционально пути резания. Интенсивность износа за этот период обработки принято оценивать относительным (удельным) износом U_0 (мкм/км)

$U_0 = U/L$, где U – размерный износ в микрометрах; L – путь резания в период нормального износа, км.

Третий период износа (участок 3) соответствует наиболее интенсивному катастрофическому износу, сопровождающемуся выкрашиванием и поломкой инструмента.

Расчет износа режущего инструмента применительно к условиям периода нормального износа производится по формуле

$$U = \frac{U_0 L}{1000}, \quad (2.1)$$

где U – размерный износ режущего инструмента, мкм; L – длина пути резания, м.

Применительно к точению длина пути резания

$$L = \frac{\pi D \cdot l}{1000 \cdot S}, \quad (2.2)$$

где D – диаметр обрабатываемой заготовки, мм; l – длина обрабатываемой заготовки (длина обработки) мм; S – подача, мм/об.

Относительный (удельный износ) U_0 режущего инструмента зависит от материала режущего инструмента и обрабатываемой детали, режима резания, геометрии режущего инструмента и жесткости технологической системы станок – приспособление – заготовка – инструмент. В табл.2.1 представлен относительный износ U_0 резцов и режимы чистового точения с глубиной $t = 0,1 \div 0,3$ мм при достижении шероховатости $Rz = 10$ мкм [7].

Влияние податливости технологической упругой системы на точность обработки

Податливостью ω технологической системы называется способность этой системы упруго деформироваться под действием внешних сил

$$\omega = y / F_y; \quad \omega = 1 / k, \quad (2.3)$$

где F_y – нормальная составляющая усилия резания; y – величина перемещения узла в направлении действия силы F_y ; k – жесткость упругой системы.

Т а б л и ц а 2.1

Обрабатываемый материал	Марка инструмента	Режимы резания		Относительный износ U_0 , мкм/км
		скорость V , м/мин	подача, мм/об	
Стали углеродистые конструкционные	Т30К4	100–180	0,04–0,08	6,5
	эльбор	550–600	0,04–0,06	3,0
Стали легированные	Т30К4	120–130	0,04–0,08	4,7
	эльбор	450–500	0,04–0,06	
Стали высоколегированные	Т30К4		80–120	6,5
	эльбор		200–220	3,0
Чугун серый	ВКЗМ	100–160	0,04–0,08	6,0
	ЦМ 332	200–300	0,03–0,06	3,5
	эльбор	300–350	0,04–0,06	2,5
Чугун высокопрочный	ВКЗМ	120–160	0,04–0,08	7,0
	ЦМ 332	300–350	0,03–0,06	4,5
	эльбор	500–550	0,04–0,06	3,5

Принимая суммарную деформацию упругой системы

$$y = y_1 + y_2 + y_3 + \dots + y_n, \quad (2.4)$$

можно вычислить суммарную податливость системы

$$\omega = \omega_1 + \omega_2 + \omega_3 + \dots + \omega_n \quad (2.5)$$

и суммарную жесткость системы k по формуле

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} + \frac{1}{k_3} + \dots + \frac{1}{k_n}. \quad (2.6)$$

При обработке вала на токарном станке при расположении резца на расстоянии x от задней бабки деформация передней и задней бабок будет определяться по формулам (рис. 2.2, а)

$$y_{п.б} = \frac{x}{l} \cdot \frac{F_y}{k_{п.б.}}; \quad y_{з.б} = \frac{(l-x)}{l} \cdot \frac{F_y}{k_{з.б.}}, \quad (2.7)$$

где $k_{п.б.}$, $k_{з.б.}$ – жесткость передней и задней бабок.

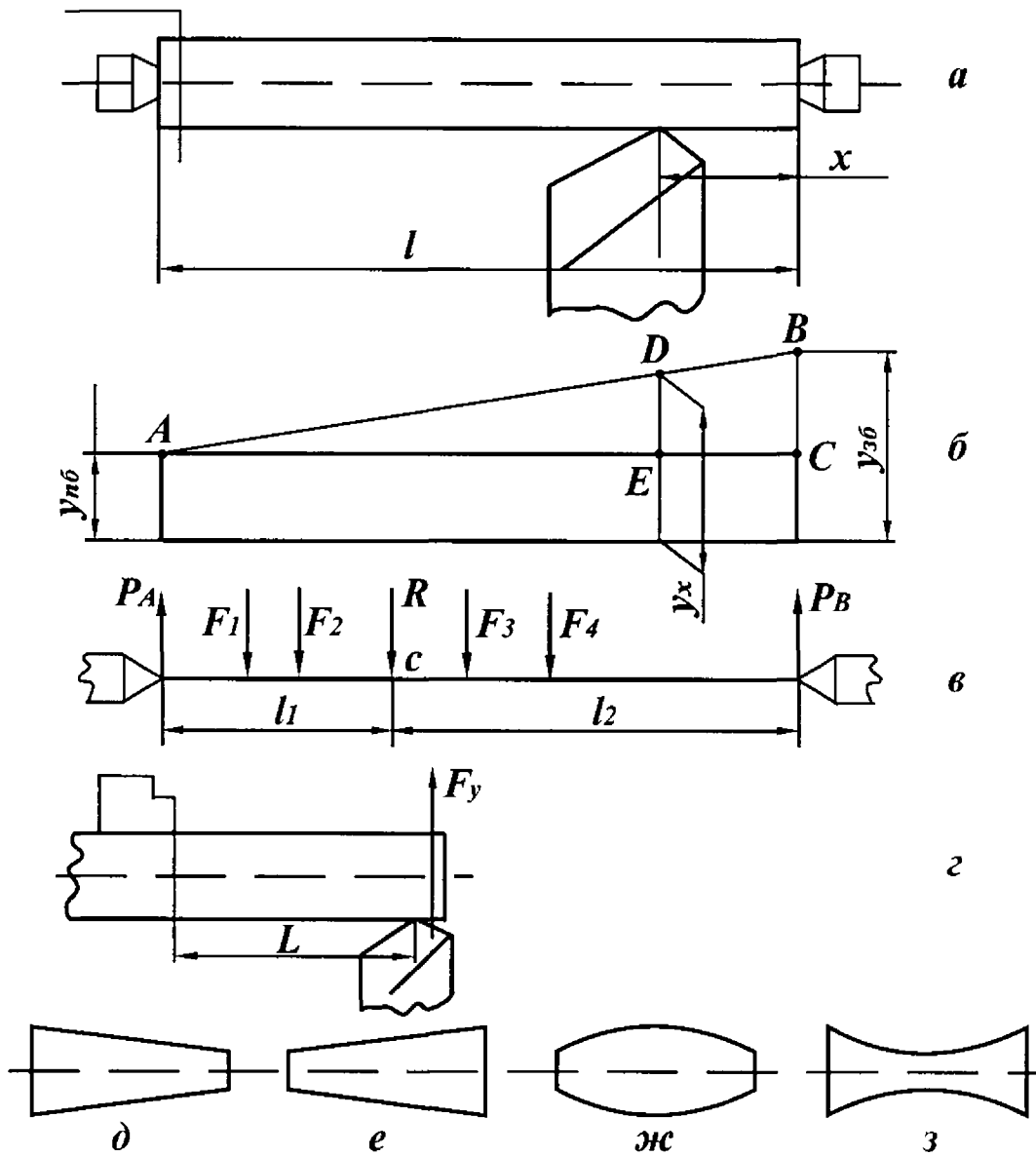


Рис.2.2. Расчетные схемы для расчета деформации узлов станка и различные формы деталей

Текущая величина деформации y_x определяется из расчетной схемы (рис. 2.2, б). Треугольники ADE и ACB подобны. Следовательно $\frac{AE}{ED} = \frac{AC}{CB}$ или $\frac{l-x}{y_x - y_{п.б.}} = \frac{l}{y_{з.б.} - y_{п.б.}}$, откуда

$$y_x l - y_{п.б.} l = y_{з.б.} (l - x) - y_{п.б.} (l - x).$$

Разделив все члены на l , получим

$$y_x = y_{з.б.} \frac{l-x}{l} - y_{п.б.} \frac{l-x}{l} + y_{п.б.},$$

или

$$y_x = \frac{x}{l} y_{п.б.} + \frac{l-x}{l} y_{з.б.} \quad (2.8)$$

После подстановки выражений (2.7) в (2.8), получим

$$y_x = \left(\frac{x}{l}\right)^2 \frac{F_y}{k_{п.б.}} + \left(\frac{l-x}{l}\right)^2 \frac{F_y}{k_{з.б.}}.$$

Форма детали после обработки изменяется по параболическому закону. Суммарную величину деформации системы с учетом податливости узлов станка и деформации детали можно найти из выражения

$$y = \frac{F_y}{k_{суп}} + \left(\frac{x}{l}\right)^2 \frac{F_y}{k_{п.б.}} + \left(\frac{l-x}{l}\right)^2 \frac{F_y}{k_{з.б.}} + \frac{F_y l^3}{48EJ}. \quad (2.9)$$

При обработке вала на токарном станке при положении резца на середине заготовки жесткость станка можно найти из выражения

$$\frac{1}{k_{ст}} = \frac{1}{k_{суп}} + \frac{1}{4} \left(\frac{1}{k_{п.б.}} + \frac{1}{k_{з.б.}} \right).$$

При многорезцовой обработке происходит упругое отжатие детали на опорах. Зная координаты расположения резцов и силы резания $F_{y_1}, F_{y_2}, F_{y_3}$ и т. д., определяется равнодействующая сила R (рис. 2.2, в). Величины деформаций передней и задней бабок определяются из выражений

$$y_{п.б.} = \frac{l_2}{l} \frac{R}{k_{п.б.}}; \quad y_{з.б.} = \frac{l_1}{l} \frac{R}{k_{з.б.}}.$$

Величина смещения точки приложения равнодействующей силы определяется из выражения

$$y_c = \left(\frac{l_2}{l}\right)^2 \frac{R}{k_{п.б.}} + \left(\frac{l_1}{l}\right)^2 \frac{R}{k_{з.б.}} = \frac{R}{l^2} \left(\frac{l_2^2}{k_{п.б.}} + \frac{l_1^2}{k_{з.б.}} \right), \quad (2.10)$$

Суммарная величина деформации

$$y_0 = \frac{R}{k_{суп.}} + \frac{R}{l^2} \left(\frac{l_2^2}{k_{п.б.}} + \frac{l_1^2}{k_{з.б.}} \right).$$

При консольном закреплении детали в патроне (рис. 2.2, з) суммарная величина деформации в точке приложения режущей кромки резца определяется из выражения

$$y = F_y \left(\frac{1}{k_{суп.}} + \frac{1}{k_{п.б.}} \right) + \frac{F_y l^3}{3EJ}, \quad (2.11)$$

где $J = \frac{\pi d^4}{64}$; E – модуль упругости материала.

С учетом податливости упругой системы станка погрешность формы обрабатываемого вала зависит от состояния величин жесткости $k_{суп.}$, $k_{п.б.}$, $k_{з.б.}$ и жесткости детали.

1. Если жесткость передней бабки меньше жесткости задней бабки – форма вала будет иметь конусообразную форму (рис. 2.2, д).

2. Если жесткость передней бабки больше жесткости задней бабки – форма вала будет иметь обратную конусность (рис. 2.2, е).

3. Если обрабатываемая деталь имеет значительно меньшую жесткость по сравнению с жесткостью передней и задней бабок, то форма детали будет иметь бочкообразную форму (рис. 2.2, ж).

4. Если жесткость передней и задней бабок значительно меньше жесткости обрабатываемого вала, то вал будет иметь седлообразную форму (рис. 2.2, з).

Приведенные зависимости свидетельствуют о том, что при прогнозировании точности обработки на стадии проектирования технологических процессов необходимо знать фактическую жесткость тех-

нологической упругой системы. Проф. Маталин А.А. [7] в результате обследования 150 одинаковых токарных станков с высотой центров 200 мм, работающих в механических цехах, показал, что жесткость станков изменяется от $K=10000 \text{ Н/мм}$ до 50000 Н/мм .

Жесткость, Н/мм^2	Количество станков в %
До 10000	16
10000–20000	42
20000–30000	22
30000–40000	10
40000–50000	7
свыше 50000	3

Многообразие факторов, влияющих на жесткость технологической системы, не позволяет при современном уровне знаний устанавливать ее расчетно-аналитическим методом. До настоящего времени методы определения жесткости станков носят экспериментальный характер.

2.3. МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЖЕСТКОСТИ СТАНКОВ

На машиностроительных заводах для определения жесткости станков применяются статический и производственный методы.

Статический метод определения жесткости. Исследуемый узел станка с помощью специального динамометра нагружается дискретно изменяющейся силой F_y .

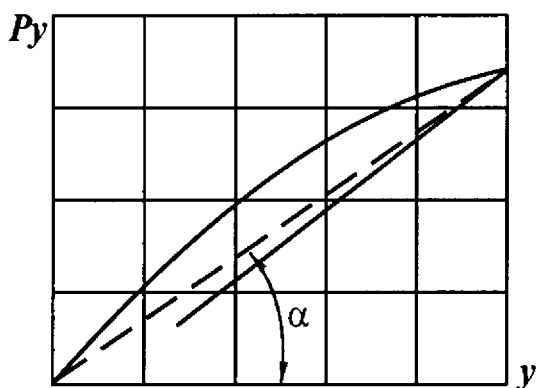


Рис. 2.3. Нагрузочная характеристика

кретно изменяющейся силой F_y . Производятся измерения величины деформации этого узла в направлении приложенной нагрузки. По результатам измерений величин деформаций строится зависимость $y = f(F_y)$ (рис. 2.3). По тангенсу угла наклона прямой судят о жесткости узла или упругой системы станка. Данный метод позволяет судить о жесткости отдельных узлов станка в процессе изготовления, ремонта и эксплуатации.

узлов станка в процессе изготовления, ремонта и эксплуатации.

Этот метод достаточно прост, доступен, однако, он недостаточно точен, так как не учитывает вибрационные процессы, которые увеличивают деформацию системы, занижая тем самым фактическую жесткость станка.

Производственные методы определения жесткости станков

1. Метод обтачивания ступенчатой или эксцентричной заготовки.

На обрабатываемой поверхности жесткого вала искусственно создается уступ или эксцентричная проточка, которые принимаются в расчетах как погрешность исходной заготовки $\Delta_{\text{исх. заг.}} = D_1 - D_2$ (рис.2.4,а). После проточки ступенчатой или эксцентричной заготовки за один проход на обработанной поверхности копируется такой же уступ, только в уменьшенном масштабе, представляющий собой погрешность обработанной заготовки $\Delta_{\text{обр. заг.}} = d_1 - d_2$ (рис.2.4,б).

По величине уточнения $E = \Delta_{\text{исх. заг.}} / \Delta_{\text{обр. заг.}}$ рассчитывают жесткость в условиях работающего станка по формуле

$$k = \lambda C_p S^{0,75} \frac{\Delta_{\text{исх. заг.}}}{\Delta_{\text{обр. заг.}}}, \quad (2.12)$$

где $\lambda = F_y / F_z$; C_p – коэффициент, характеризующий обрабатываемый материал; S – подача, мм/об.

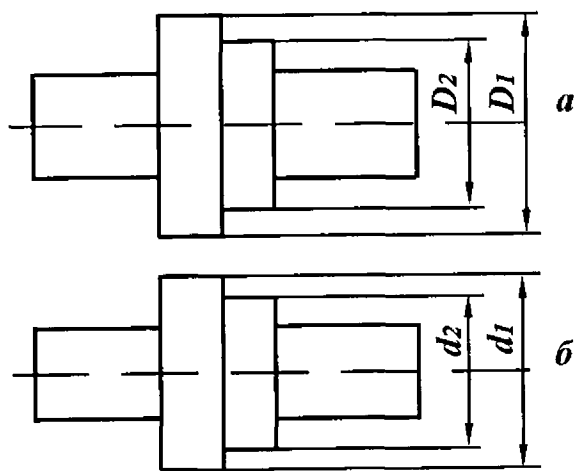


Рис. 2.4. Ступенчатые заготовки: а – до обработки, б – после обработки

Величина C_p зависит от физико-механических средств обрабатываемого материала. Например, для машиноподелочной стали $C_p = 144 \div 205$; хромистой и хромоникелевой стали $C_p = 182 \div 251$; для чугунов $C_p = 100 \div 150$. Величина отношения составляющих усилия резания F_y / F_z зависит от геометрических параметров режущей части инструмента и

условий обработки. Этот параметр изменяется от 0,3 до 0,65.

Приведенные колебания величин, входящих в формулу (2.12), свидетельствуют о том, что точность расчетов зависит от того, насколько правильно произведен выбор параметров, входящих в данную формулу. Следует заметить, что в технической литературе отсутствуют какие-либо конкретные рекомендации по выбору указанных параметров (C_p и λ). Если принять в расчетах предельные значения отношения составляющих силы резания F_y/F_z , то результаты расчета по формуле (2.12) будут весьма противоречивы. Например, допустим, что измерение перепада диаметров до обработки $(D_1 - D_2) = \Delta D$ и после обработки $(d_1 - d_2) = \Delta d$ произведено достаточно точно и значение C_p выбрано правильно, но допущена ошибка в выборе параметра F_y/F_z .

При $F_y/F_z = 0,3$ и $C_p = 200$, $k = 200 \cdot 0,3 A = 60 A$,
 при $F_y/F_z = 0,65$ и $C_p = 200$, $k = 200 \cdot 0,65 A = 120 A$,

где $A = S^{0,75} \frac{\Delta_{\text{исх. заг.}}}{\Delta_{\text{обр. заг.}}}$.

Принимая условно $A=250$, получим $k_1=15000$ Н/мм; $k_2=32500$ Н/мм.

Из приведенного примера видно, что допущенная неточность в выборе только одного параметра λ искажает расчетную величину показаний жесткости упругой системы более чем в 2 раза.

Если учесть, что в производственных условиях, наряду с неточностью выбора параметра λ , возможна ошибка и в выборе C_p , то полученные результаты по расчету жесткости будут совершенно недопустимы. Например,

при $C_p=144$, $\lambda=0,3$ $k_1=144 \cdot 0,3 \cdot 250=10800$ Н/мм ,
 при $C_p=205$, $\lambda=0,65$ $k_2=205 \cdot 0,65 \cdot 250=33250$ Н/мм.

Приведенные данные свидетельствуют о том, что ошибки при выборе параметров C_p и λ вызывают разброс показаний жесткости более чем в 3 раза. Учитывая недостатки рассмотренного метода, авторами предложен метод определения жесткости станков, лишенный указанных недостатков [2].

2.Метод обтачивания ступенчатой заготовки на двух оправках разной жесткости.

Данный метод предусматривает процесс обтачивания одного и того же ступенчатого образца (рис. 2.5, а) на двух оправках разной жесткости или на оправке, имеющей различную жесткость в двух взаимно перпендикулярных направлениях (рис. 2.5, б).

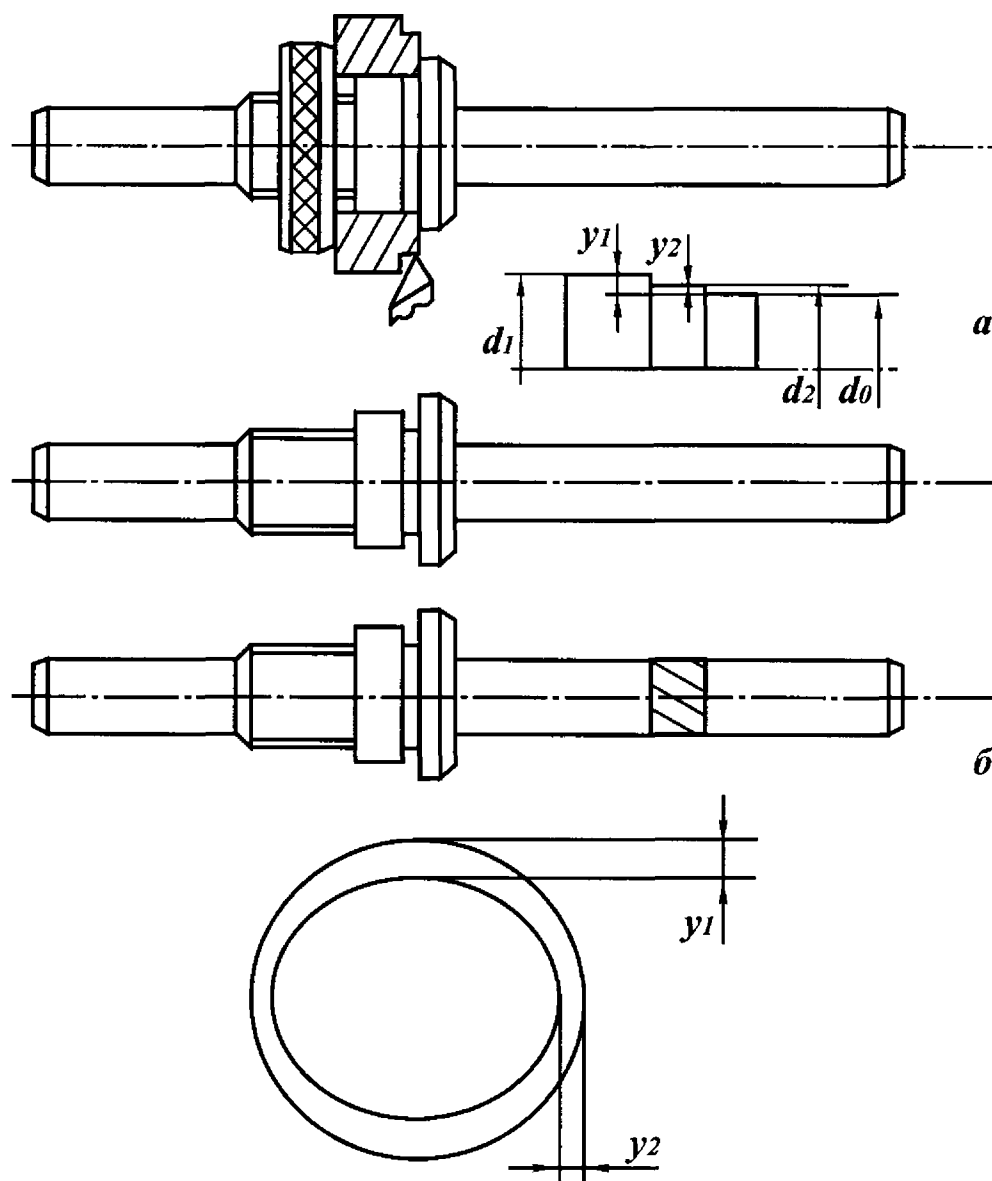


Рис.2.5. Расчетная схема (а) и оправки разной жесткости (б)

Перепад диаметров d_1 и d_2 ступенчатого образца должен быть равен 3,0 – 4,0 мм.

При обтачивании припуска на сторону $z=1,5...2,0$ мм за проход сначала на одной оправке, а затем на второй за счет податливости уп-

ругой системы (элементы станка: суппорт, передняя и задняя бабки и оправка) на образце возникнут две ступени

$$y_1 = \frac{d_1 - d_0}{2} \approx 0,06 \text{ мм} \text{ и } y_2 = \frac{d_2 - d_0}{2} \approx 0,03 \text{ мм}.$$

Для вывода формулы для определения жесткости станка можно сделать допущение, что нормальные составляющие усилия резания, невзирая на различную величину прогиба оправок, будут равны

$$F_{y_1} = F_{y_2},$$

где F_{y_1} и F_{y_2} – составляющие усилия резания при обработке ступенчатого образца на первой и второй оправках.

Смещение режущей кромки инструмента относительно обрабатываемой детали за счет податливости узлов станка и оправки определяется из выражения

$$y = F_y \left(\frac{1}{k_{\text{суп}}} + \frac{1}{4} \left(\frac{1}{k_{\text{п.б.}}} + \frac{1}{k_{\text{з.б.}}} \right) + \frac{1}{k_{\text{опр}}} \right).$$

Податливость упругой системы узлов токарного станка

$$\frac{1}{k_{\text{ст}}} = \frac{1}{k_{\text{суп}}} + \frac{1}{4} \left(\frac{1}{k_{\text{п.б.}}} + \frac{1}{k_{\text{з.б.}}} \right).$$

Из равенства усилий резания получим

$$\frac{y_1}{\frac{1}{k_{\text{ст}}} + \frac{1}{k_{\text{опр}_1}}} = \frac{y_2}{\frac{1}{k_{\text{ст}}} + \frac{1}{k_{\text{опр}_2}}}.$$

После преобразования получим формулу для определения жесткости упругой системы станка

$$K_{\text{ст}} = \frac{(y_1 - y_2) \cdot K_{\text{опр}_1} \cdot K_{\text{опр}_2}}{K_{\text{опр}_2} \cdot y_2 - K_{\text{опр}_1} \cdot y_1}. \quad (2.13)$$

Для проверки стабильности показаний рассмотренного метода проводились опыты на токарновинторезном станке К62. На образце $\varnothing 150$ мм $l = 50$ мм протачивалась ступень $\frac{d_1 - d_2}{2} = 1,5$ мм.

Ступенчатый образец обтачивался на оправке, которая имела разную жесткость в двух взаимно перпендикулярных направлениях [3] (рис. 2.5, б). Предварительно определялась жесткость оправки в направлении осей x и y . Суммарная деформация измерялась головкой миниметра с ценой деления 0,002 мм, установленной в резцедержателе станка.

Опыты проводились в следующей последовательности:

1. Ступенчатый образец устанавливали на оправку с жесткостью $K_1 = 9200$ Н/мм, $K_2 = 21000$ Н/мм.

2. Образец протачивался резцами $\varphi_1 = 45^\circ$ и $\varphi_2 = 60^\circ$ с последующим измерением величины отжатия y_1 и y_2 .

По формуле (2.13) определялась жесткость станка. В табл. 2.2. представлены расчетные значения жесткости станка.

Т а б л и ц а 2.2 .

№ опыта	φ°	y_1 , мм	y_2 , мм	$K_{\text{опр1}}$, Н/мм	$K_{\text{опр2}}$, Н/мм	$K_{\text{ст}}$, Н/мм
1	45	0,071	0,02	5306	10000	6682
2	60	0,06	0,018	5306	10000	6684

2.4. РАСЧЕТ УПРУГИХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ

Определяющее влияние на точность обработки оказывает силовой фактор, вызывающий упругие перемещения в системе y_0

$$y_0 = \frac{F_y}{k}, \quad (2.14)$$

где F_y – радиальная составляющая силы резания; k – приведенная жесткость системы.

Радиальную составляющую силы резания можно представить в виде

$$F_y = \frac{F_z}{k_{\text{рез}}},$$

где $F_z = \sigma S$ – тангенциальная сила резания; σ – условное напряжение резания; S – площадь поперечного сечения среза; $k_{\text{рез}}$ – коэффициент резания.

В свою очередь $S = \frac{Q_0}{V_{\text{рез}}}$, где $Q_0 = t S_{\text{прод}} V_{\text{рез}}$ – номинальная производительность обработки; $V_{\text{рез}}$ – скорость резания; t – глубина резания; $S_{\text{пр}}$ – продольная подача на оборот детали.

При однопроходном шлифовании

$$y_0 = \frac{\sigma}{k_{\text{рез}}} \cdot \frac{t \cdot S_{\text{прод}}}{k} \quad (2.15)$$

или

$$y_0 = \frac{\sigma}{k_{\text{рез}}} \cdot \frac{Q_0}{V_{\text{рез}}} \cdot \frac{1}{k}. \quad (2.16)$$

Упругое перемещение y_0 тем меньше, чем меньше отношение $\sigma / k_{\text{рез}}$ и производительность Q_0 и чем больше скорость резания $V_{\text{рез}}$ и жесткость k . Как видно, величина y_0 зависит от трех групп параметров: $\sigma / k_{\text{рез}}$ – характеризует процесс резания, $Q_0 / V_{\text{рез}}$ – характеризует режим резания, k – жесткость системы.

Для обеспечения точности при однопроходной обработке необходимо учитывать величину упругих отжатий. Глубину резания t следует устанавливать с учетом припуска на обработку Π и величины деформации упругой системы y_0 . $t = \Pi + y_0$. С учетом $y_0 = t - \Pi$ и выражения (2.15) глубину резания t , обеспечивающую требуемую точность, можно найти из выражения

$$t = \frac{\Pi}{\left(1 - \frac{\sigma}{k_{\text{рез}}} \frac{S_{\text{прод}}}{k}\right)}. \quad (2.17)$$

Чем меньше отношение $\sigma/k_{рез}$ и больше жесткость k , тем меньше отличие t и Π .

Текущие значения Q и y определяются из выражений

$$Q = Q_0 \left(1 - \ell \frac{V_{рез} k_{рез} k \tau}{\pi D_{дет} l_{дет} \sigma} \right), \quad (2.18)$$

$$y = \frac{\sigma Q_0}{V_{рез} k_{рез} k} \left(1 - \ell \frac{V_{рез} k_{рез} k \tau}{\pi D_{дет} l_{дет} \sigma} \right). \quad (2.19)$$

В выражениях (2.18), (2.19) присутствует временной фактор τ .

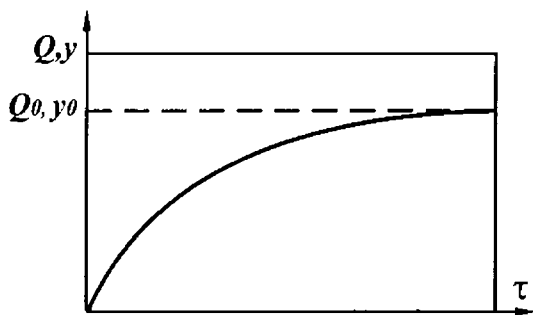


Рис. 2.6. Зависимость производительности Q и величины упругих перемещений y_0 от времени

Следовательно, производительность Q и величина упругих перемещений y асимптотически увеличиваясь, приближаются к номинальным значениям Q_0 и y_0 (рис.2.6).

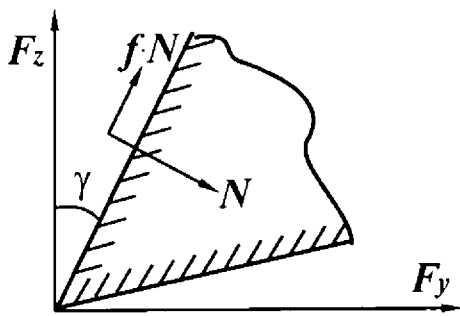
Создание предварительного натяга в системе исключает переходный период, при котором фактические показатели Q и y существенно отличаются от номинального.

Создание предварительного натяга в системе достигается за счет увеличения произведения параметров $\frac{k_{рез}}{\sigma} k V_{рез}$. Если исключить экспоненту (переходный период) то зависимости (2.18), (2.19) примут вид

$$Q = Q_0, \quad (2.20)$$

$$y = \frac{\sigma Q_0}{V_{рез} k_{рез} k}. \quad (2.21)$$

На величину упругих перемещений, как видно из выражения (2.21), оказывает существенное влияние отношение $\sigma / k_{рез}$.



Коэффициент резания $k_{рез}$ определяется из системы уравнений, описывающих силы резания N и fN , которые возникают на передней поверхности резца (рис.2.7), где f – средний коэффициент трения

Рис.2.7. Схема сил, действующих на передней поверхности инструмента

$$\begin{cases} F_z = N \cos \gamma + fN \sin \gamma \\ F_y = -N \sin \gamma + fN \cos \gamma \end{cases} \quad (2.22)$$

где γ – передний угол инструмента.

Откуда

$$k_{рез} = \frac{1 + f \operatorname{tg} \gamma}{f - \operatorname{tg} \gamma}. \quad (2.23)$$

С увеличением угла γ коэффициент резания $k_{рез}$ возрастает. При $\operatorname{tg} \gamma \rightarrow f$ параметр $k_{рез}$ стремится к бесконечности. Чем меньше коэффициент трения f , тем больше параметр $k_{рез}$.

На рис. 2.8 представлена зависимость коэффициента резания от переднего угла γ , подтверждающая выводы, вытекающие из зависимости (2.23).

При движении режущего инструмента в обрабатываемом материале возникают касательные напряжения в плоскости, расположенной под углом β (рис. 2.9). Эти напряжения вызывают сдвиговые деформации и образование стружки.

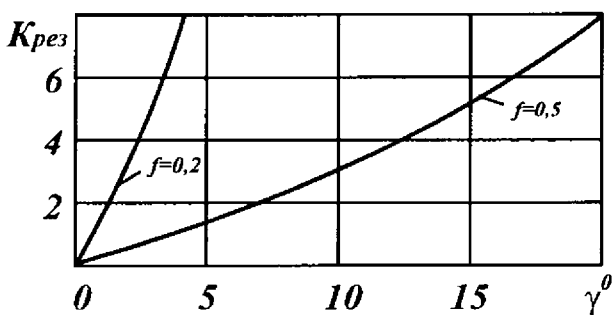


Рис.2.8. Зависимость коэффициента резания от переднего угла γ

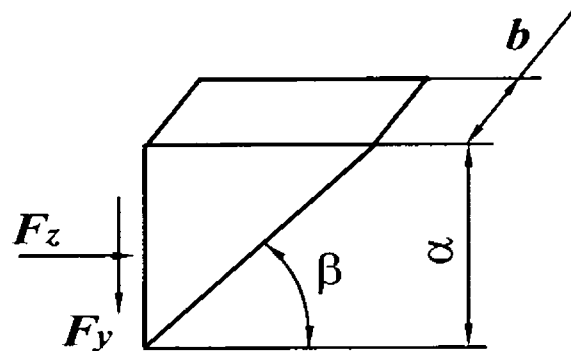


Рис.2.9. Расчетная схема параметров стружкообразования

Касательные напряжения τ можно определить из выражения [1]

$$\tau = \frac{F_y}{ab} (k_{\text{рез}} 0,5 \sin 2\beta - \sin^2 \beta). \quad (2.24)$$

Приравнивая первую производную $\tau'(\beta)$ к нулю, можно найти экстремальное значение угла β , при котором касательное напряжение достигает максимального значения

$$\operatorname{tg} 2\beta = k_{\text{рез}}. \quad (2.25)$$

Принимая условие $\tau = \tau_{\text{сдв}}$ (где $\tau_{\text{сдв}}$ – предел прочности обрабатываемого материала на сдвиг), из зависимости (2.24) с учетом (2.25) определяется условное напряжение резания σ [1]

$$\sigma = \frac{\tau_{\text{сдв}}}{k_{\text{рез}} \left[\frac{1}{2\sqrt{1-k_{\text{рез}}^2}} - \frac{1}{(4+k_{\text{рез}}^2)} \right]}. \quad (2.26)$$

При $k_{\text{рез}} < 1$ зависимость (2.26) упрощается

$$\sigma = \frac{4}{k_{\text{рез}}} \tau_{\text{сдв}}. \quad (2.27)$$

При обработке хрупких материалов, например, чугуна, при достижении в плоскости сдвига предельных напряжений $\tau_{\text{сдв}}$ происходит разрушение с отделением элементарного объема от основного материала.

При обработке пластичных (вязких) материалов отделения элементарных объемов не происходит. Здесь имеет место пластическое течение материала по плоскости сдвига при постоянной предельной нагрузке $\tau_{\text{сдв}}$. Пластический сдвиг по плоскости $a-a'$ будет продолжаться до тех пор, пока в сечении $b-b'$ (рис. 2.10) (условной плоскости сдвига) напряжение сдвига не достигнет предельных касательных напряжений.

тельных напряжений $\tau = \tau_{\text{сдв}}$. С появлением пластического течения материала в плоскости $b-b'$ сдвиг металла в плоскости $a-a'$ прекратится. Элементарные объемы I и II, имея жесткую связь, будут перемещаться по дискретно сменяющимся вновь образованным плоскостям сдвига, образуя сплошную стружку.

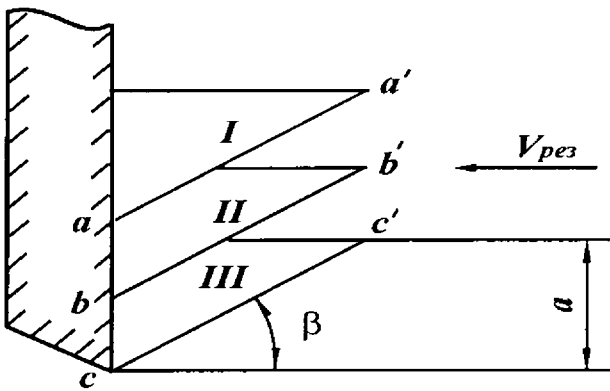


Рис.2.10. Схема пластического течения материала

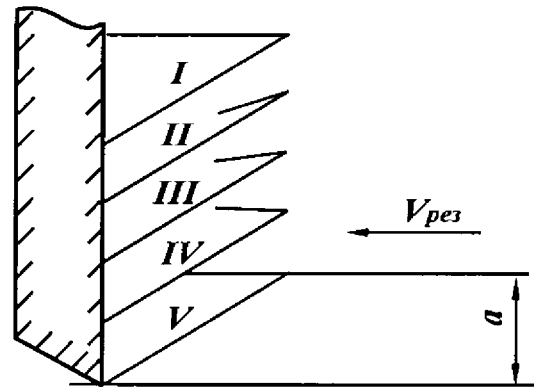


Рис.2.11. Схема пластического течения материала при обработке с малыми глубинами резания

Составляющие силы резания F_z и F_y равны сумме сил, возникающих от контакта элементарных объемов металла I и II с передней поверхностью резца. При резании с малыми толщинами среза от величины радиуса округления вершины резца зависит количество контактов элементарных объемов стружки III, IV, V – (рис. 2.11) с передней поверхностью резца. Составляющие силы резания можно представить в виде

$$F_z = nF'_z, \quad F_y = nF'_y,$$

где n – количество плоскостей сдвига, в которых происходит течение материала.

Соответственно зависимость (2.26) примет вид

$$\sigma = \frac{n\tau_{\text{сдв}}}{k_{\text{рез}} \left[\frac{1}{2\sqrt{1+k_{\text{рез}}^2}} - \frac{1}{(4+k_{\text{рез}}^2)} \right]}. \quad (2.28)$$

При малых толщинах среза $k_{рез} < 1$ выражение (2.28) можно представить в виде

$$\sigma = \frac{4n\tau_{сдв}}{k_{рез}}. \quad (2.29)$$

Полученные зависимости позволяют объяснить существенное расхождение (до 5 и более раз) расчетных и экспериментальных данных при алмазном тонком точении пластичных материалов: меди, латуни и др. [1].

Параметр σ в общем случае зависит от отношения a_z/ρ , где a_z – толщина среза; ρ – радиус округления вершины резца. Чем меньше отношение a_z/ρ , тем больше число n и тем больше условное напряжение резания.

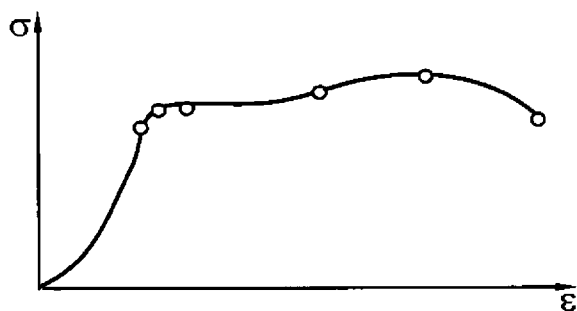


Рис.2.12. Диаграмма напряжения σ от деформации ϵ

По диаграмме «напряжение – деформация» можно судить о параметре n (рис. 2.12). Чем больше степень деформации металла до момента его разрушения, тем большее количество плоскостей сдвига n . Для хрупких материалов $n = 1$, для пластичных $n \geq 2$.

Пластичные материалы по сравнению с хрупкими имеют значительно меньшее предельное касательное напряжение на сдвиг $\tau_{сдв}$, но значительно большее условное напряжение резания σ .

В технической литературе отсутствуют данные, позволяющие установить функциональную связь между прочностью материала и возникающими силами резания. Этим можно объяснить отсутствие аналитических зависимостей, позволяющих рассчитывать силы резания, а используются, как правило, эмпирические зависимости. Полученные зависимости создают основу для расчета параметров силовой напряженности, не прибегая к экспериментально полученным зависимостям. При точении резцом с радиусом округления вершины ρ касательное напряжение τ в плоскости сдвига определяется [1]

$$\tau = \frac{p\rho}{a_z} \sin \beta \left[\sin(90^\circ + \beta) - \sin(\varphi_0 + \beta) \right], \quad (2.30)$$

где p – твердость обрабатываемого материала; $(90^\circ - \varphi_0)$ – угол контакта режущей кромки резца с материалом.

Экстремальное значение угла β , соответствующее максимуму функции τ , полученное из условия $\tau'(\beta)$, после преобразований примет вид

$$\beta = 22,5 - \frac{\varphi_0}{4}. \quad (2.31)$$

Следовательно, угол сдвига β изменяется в пределах $0 \dots 22,5^\circ$.

При $\tau = \tau_{\text{сдв}}$ с учетом (2.31) угол сдвига определяется из выражения [1]

$$\beta = 3 \sqrt{\frac{\tau_{\text{сдв}} a_z}{4 p \rho}}. \quad (2.32)$$

Соответственно параметры σ и $k_{\text{рез}}$ выразятся [3]

$$\sigma = 3 \sqrt{\frac{32 \tau_{\text{сдв}}^2 p \rho}{a_z}}, \quad (2.33)$$

$$k_{\text{рез}} = \sqrt{\frac{2 \tau_{\text{сдв}} a_z}{p \rho}}. \quad (2.34)$$

Из зависимостей (2.33) и (2.34) следует, что произведение параметров σ и $k_{\text{рез}}$ имеет постоянное значение и равно $4 \tau_{\text{сдв}} \approx 2 \sigma_{\text{сж}}$, а отношение $\sigma/k_{\text{рез}}$ равно

$$\frac{\sigma}{k_{\text{рез}}} = \sqrt{\frac{16 \tau_{\text{сдв}} p^2 \rho^2}{a_z}}. \quad (2.35)$$

Из приведенной зависимости следует, что уменьшение достигается за счет увеличения соотношения a_z/ρ . Физико-механические характеристики обрабатываемого материала ($\tau_{\text{сдв}}$ и p) оказывают также большое влияние на отношение параметров $\sigma/k_{\text{рез}}$.

При условии обработки, когда $k_{рез} > 1$, а условное напряжение резания $\sigma = 2\sigma_{сж}$ ($\sigma_{сж}$ – предел прочности материала на сжатие) параметр y_0 , исходя из зависимости (2.15), будет представлен в виде

$$y_0 = \frac{2\sigma_{сж}}{k_{рез}} \cdot \frac{Q_0}{V_{рез}} \cdot \frac{1}{k}. \quad (2.36)$$

Величина деформации системы, как видно из выражения (2.36), обратно пропорциональна жесткости упругой системы k , скорости резания $V_{рез}$ и параметру $k_{рез}$.

2.5. УПРУГИЕ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ПРИ АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКЕ

При абразивной обработке параметры $k_{ш} = F_z/F_y$ и σ выражаются через безразмерный параметр η , учитывающий степень затупления зерна. Этот параметр изменяется в пределах 0...1 (для острого зерна $\eta \rightarrow 0$, для затупленного зерна $\eta \rightarrow 1$)

$$k_{ш} = \sqrt{\frac{4\sigma_{сж}}{\pi \operatorname{tg} \gamma p} (1 - \eta)}, \quad (2.37)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\pi \operatorname{tg} \gamma \sigma_{сж} p}{1 - \eta}}. \quad (2.38)$$

С физической точки зрения параметр η равен отношению величины изношенной части зерна x и высоты выступания из связки неизношенного зерна H (рис. 2.13). Следовательно, уменьшить параметр η можно путем изыскания способов, уменьшающих величину линейного износа зерен x . Для поддержания на шлифовальном круге острого режущего рельефа ($\eta \rightarrow 0$) необходимо обеспечить самозатачивание путем применения алмазных кругов на малопрочных органических связках или осуществления в процессе обработки непрерывной правки. Высокая эффективность достигается при использовании электрохимических методов непрерывной правки алмазных кру-

гов на металлических связках (электроэрозионной и электрохимической правки).

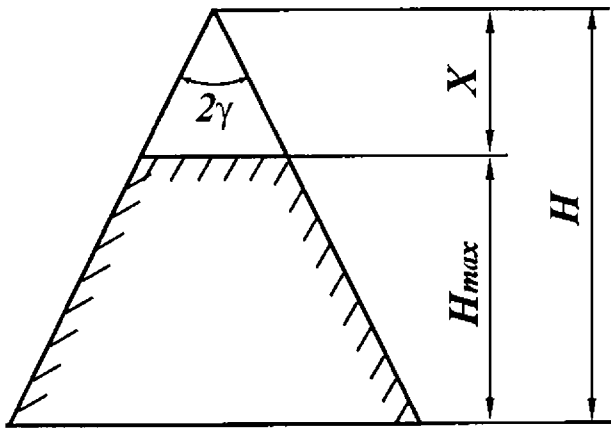


Рис. 2.13. Расчетная схема для определения износа зерен

Увеличение параметра H достигается путем применения крупнозернистых высокопористых шлифовальных кругов.

При работе круга в режиме затупления параметр η с течением времени обработки увеличивается ($\eta \rightarrow 1$), а отношение $\sigma/k_{ш}$ стремится к бесконечности.

Окончательная точность обработки формируется на выхаживающих проходах. Для процесса выхаживания производительность Q и упругое перемещение y

определяются из выражений

$$Q = \frac{y_H V_{кр} k_{ш} k}{\sigma} \ell \frac{V_{кр} k_{ш} k}{\pi D_{дет} l_{дет} \sigma} \tau, \quad (2.39)$$

$$y = y_H \ell \frac{V_{кр} k_{ш} k}{\pi D_{дет} l_{дет} \sigma} \tau, \quad (2.40)$$

где $V_{кр}$ – скорость круга; $k_{ш}$ – коэффициент шлифования; k – жесткость; $D_{дет}$ – диаметр детали; $l_{дет}$ – длина обрабатываемой детали; σ – условное напряжение шлифования; y_H – величина предварительного натяга в системе.

Параметры Q и y зависят от величины предварительного натяга в системе y_H . Чем больше натяг, тем больше продолжительность выхаживания τ . Чем больше скорость круга $V_{кр}$, жесткость системы s и отношение $k_{ш}/\sigma$, тем быстрее достигается требуемая точность при выхаживании.

Производя замену в выражении (2.19) параметров $V_{рез}$ на скорость круга $V_{кр}$, $k_{рез}$ на $k_{ш}$ и принимая $Q_0 = \pi D_{дет} \cdot l_{дет} \cdot S_{рад}$ (для

круглого врезного шлифования) и время $\tau = \Pi/S_{рез}$ (где Π – припуск на сторону), получим выражение для расчета текущего значения величины деформации системы при шлифовании y

$$y = \frac{\sigma Q_0}{V_{kp} k_{ш} k} \left(1 - \ell^{-\frac{V_{kp} k_{ш} k \tau}{\pi D_{дет} l_{дет} \sigma}} \right). \quad (2.41)$$

Из полученного выражения видно, что по мере увеличения времени шлифования τ текущее значение y стремится к постоянному установившемуся значению

$$y_{уст} = \frac{\sigma Q_0}{V_{kp} k_{ш} k}. \quad (2.42)$$

С учетом погрешности формы цилиндрической заготовки величина деформации системы определяется из выражения

$$y = y_{уст} \left(1 - \ell^{-\frac{\Pi}{y_{уст}}} \right), \quad (2.43)$$

где Π – припуск на обработку.

Погрешность зацентровки цилиндрической детали смещает ось вращения заготовки, вызывая неравномерность снимаемого припуска в пределах от Π_{max} до Π_{min} .

Неравномерность снимаемого припуска вызывает изменение податливости упругой системы за период одного оборота заготовки и, как следствие, появление погрешности обрабатываемой детали

$$\Delta y = y_{max} - y_{min}, \quad (2.44)$$

$$y_{max} = y_{уст} \left(1 - \ell^{-\frac{\Pi_{max}}{y_{уст}}} \right), \quad (2.45)$$

$$y_{\min} = y_{\text{уст}} \left(1 - \ell \frac{-\Pi_{\min}}{y_{\text{уст}}} \right), \quad (2.46)$$

откуда

$$\Delta y = y_{\text{уст}} \left(\ell \frac{\Pi_{\max}}{y_{\text{уст}}} - \ell \frac{-\Pi_{\min}}{y_{\text{уст}}} \right).$$

Чем больше погрешность исходной заготовки детали $\Delta\Pi$, тем больше погрешность Δy .

При выхаживании неизвестные параметры – максимальный припуск Π_{\max} и необходимое время для исправления погрешности формы τ – определяются из системы уравнений

$$\begin{cases} y_{\max} = \Pi_{\max} \ell \frac{V_{kp} c k_{ш} \tau}{\pi D_{\text{дет}} l_{\text{дет}} \sigma} \\ \Delta y = \Delta\Pi \ell \frac{V_{kp} c k_{ш} \tau}{\pi D_{\text{дет}} l_{\text{дет}} \sigma} \end{cases} \quad (2.47)$$

Для определения времени выхаживания τ систему уравнений (2.47) представим в виде

$$\begin{cases} y_{\max} = \Pi_{\max} \ell^{-x_1} \\ \Delta y = \Delta\Pi \ell^{-x_1} \end{cases}, \quad (2.48)$$

где $x_1 = \frac{V_{kp} k_{ш} k \tau}{\pi D_{\text{дет}} l_{\text{дет}} \sigma}$.

Из системы уравнений (2.48), получим

$$\begin{cases} \Pi_{\max} = y_{\max} \frac{\Delta\Pi}{\Delta y} \\ x_1 = \ln \frac{\Delta\Pi}{\Delta y} \end{cases} \quad (2.49)$$

$$x_1 = \frac{\lambda \tau}{\pi D_{\text{дет}} l_{\text{дет}}},$$

где λ определяется по формуле [1]

$$\lambda = \frac{2V_{kp}(1-\eta)}{\pi \text{tg}\gamma p}, \quad (2.50)$$

где p – твердость обрабатываемого материала.

Параметр η определяется из зависимости [1]

$$H = \sqrt[3]{\frac{630\pi \bar{x}^3 V_{\text{дет}} \sqrt{t\rho}}{mV_{kp}(1-\eta^2)}}. \quad (2.51)$$

Принимая $H = x/\eta$, получим

$$\frac{(1-\eta^2)}{\eta^3} = \frac{630\pi \bar{x}^3 V_{\text{дет}} \sqrt{t\rho}}{mV_{kp}x^3}, \quad (2.52)$$

где x – величина линейного износа зерна; \bar{x} – зернистость круга; m – объемная концентрация круга; $V_{\text{дет}}$ – скорость детали; t – глубина шлифования; $\rho = \frac{1}{R_{kp}} + \frac{1}{R_{\text{дет}}}$.

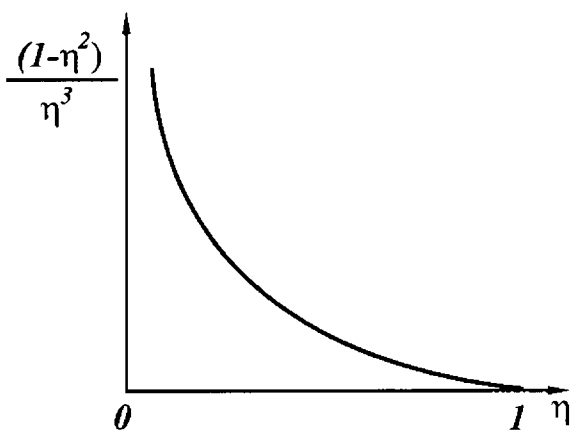


Рис. 2.14. Зависимость $(1-\eta^2)/\eta^3$ от параметра η

Функция $(1-\eta^2)/\eta^3$ при изменении η от 0 до 1 изменяется от ∞ до 0. Условие $(1-\eta^2)/\eta^3 \rightarrow \infty$ реализуется при $x \rightarrow 0$.

На рис.2.14 представлена зависимость $(1-\eta^2)/\eta^3 = f(\eta)$.

Уменьшить параметр η можно за счет увеличения параметров \bar{x} , $V_{\text{дет}}$, t и уменьшения m , V_{kp} , x .

Глубину шлифования t можно представить в виде

$$t = \frac{Q}{BV_{\text{дет}}}, \quad (2.53)$$

где Q – текущая производительность; B – ширина шлифования. После подстановки в (2.53) текущей производительности

$$Q = \lambda k \Pi_{\text{max}} \ell^{-\frac{\lambda \tau}{\pi D_{\text{дет}} l_{\text{дет}}}}$$

выражение для глубины шлифования t будет иметь следующий вид

$$t = \frac{\lambda k \Pi_{\text{max}}}{BV_{\text{дет}}} \ell^{-\frac{\lambda \tau}{\pi D_{\text{дет}} l_{\text{дет}}}}. \quad (2.54)$$

С течением времени τ глубина шлифования t будет уменьшаться. Увеличить Q и t можно путем стабилизации во времени параметра λ . Это достигается, как видно из (2.50), стабильным поддержанием во времени параметра η .

Проведенный теоретический анализ точности изготовления деталей позволил установить связь величины упругих перемещений y_0 и производительности Q_0 с условным напряжением резания σ , коэффициентом резания $k_{\text{рез}}$, режимами обработки t , $S_{\text{пр}}$, $V_{\text{рез}}$ и жесткостью упругой системы k .

Для обеспечения точности при однопроходной обработке надо учитывать величину упругих деформаций. Глубину резания следует устанавливать с учетом податливости упругой системы и отношения $\sigma/k_{\text{рез}}$ из (2.17).

При обработке хрупких материалов, например, чугуна, в плоскости сдвига происходит разрушение с отделением стружки. При обработке пластичных материалов при достижении предельных значений $\sigma_{\text{сдв}}$ происходит течение материала по плоскости сдвига. Пластический сдвиг по плоскости $a - a'$ (рис. 2.10) продолжается до тех пор, пока в плоскости $b - b'$ напряжение сдвига не достигает предельных касательных напряжений $\tau = \tau_{\text{сдв}}$.

Установлено, что чем больше степень деформации металла до момента его разрушения, тем большее количество плоскостей сдвига n (рис.2.11). Для хрупких материалов $n = 1$, для пластичных (вязких) $n \geq 2$.

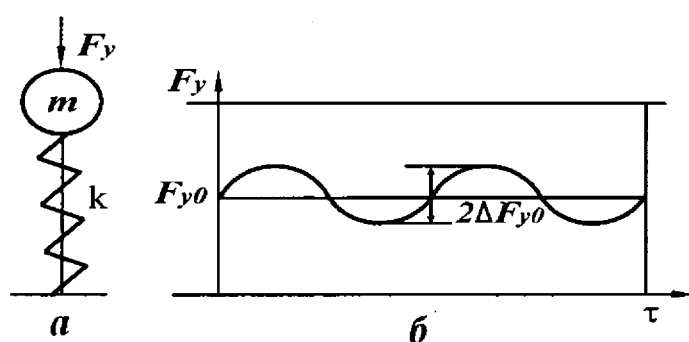
Отношение $\sigma/k_{рез}$ уменьшается с увеличением a_z/ρ . Установлена связь отношения $\sigma/k_{ш}$ с параметром $\eta = x/H$. С увеличением η от 0 до 1 отношение $\sigma/k_{ш}$ изменяется от нуля до бесконечности.

Для поддержания на шлифовальном круге острого режущего рельефа ($x \rightarrow 0$) необходимо обеспечить его самозатачивание путем применения прерывистых кругов или производить в процессе шлифования непрерывную правку (электроэрозионную или электрохимическую).

2.6. ВЛИЯНИЕ ДИНАМИКИ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ НА ТОЧНОСТЬ ОБРАБОТКИ

Неравномерность снимаемого припуска по диаметру, неуравновешенность вращающихся масс станка и другие факторы вызывают колебания сил резания и возникновение вынужденных колебаний. При этих условиях снижается точность обработки.

Для управления точностью обработки необходимо установить функциональную связь динамических параметров процесса резания с амплитудой колебаний режущей кромки инструмента.



Для определения статических и динамических характеристик упругой системы станка представим деталь в виде одномассовой динамической модели (рис. 2.15, а) с изменяющейся по синусоидальному закону силой резания F_y (рис.2.15,б).

Гармонические колебания одномассовой динамической модели можно описать дифференциальным уравнением вида

Рис. 2.15. Схема одномассовой динамической модели и гармонические ее колебания

$$m\ddot{y} + ky = F_{y0} + \Delta F_{y0} \sin \omega \tau, \quad (2.55)$$

где m и k – приведенные масса и жесткость системы; \ddot{y} – ускорение движения массы; F_{y_0} – статическая составляющая силы F_y ; ΔF_{y_0} – амплитуда колебаний силы F_y ; ω – частота колебаний.

Решение дифференциального уравнения (2.55) имеет вид

$$y = \frac{F_{y_0}}{k} + \frac{\Delta F_{y_0}}{(p_1^2 - \omega^2)m} \sin \omega \tau, \quad (2.56)$$

где $p_1 = \sqrt{\frac{k}{m}}$ – собственная частота колебаний системы.

Установлено, что при $p_1 > \omega$ роль динамики незначительна; при $p_1 \rightarrow \omega$ амплитуда колебаний неограниченно возрастает за счет второго слагаемого выражения (2.56), которое можно представить в виде

$$\frac{y_{cm}}{\left(1 - \frac{\omega^2}{p^2}\right)} \sin \omega \tau,$$

где $y_{cm} = \Delta F_{y_0} / k$ (рис. 2.16).

В работе [13] показано, что резонансные явления проявляются не сразу, а через определенный промежуток времени. Это вытекает из обобщенного интеграла при $\omega = p_1$ (для второго слагаемого выражения 2.56)

$$y = \frac{\Delta F_y}{mp_1} \int_0^\tau \sin p_1 t_1 \sin p_1 (\tau - t_1) dt_1, \quad (2.57)$$

после его вычисления

$$y = y_{cm} (\sin p_1 \tau - p_1 \tau \cos p_1 \tau), \quad (2.58)$$

где t_1 – новая переменная ($0 < t_1 < \tau$).

Перемещение y с течением времени возрастает по линейному закону и через определенное время обращается в бесконечность. Поэтому, при непродолжительной обработке в резонансном режиме можно избежать возникновения погрешностей обработки.

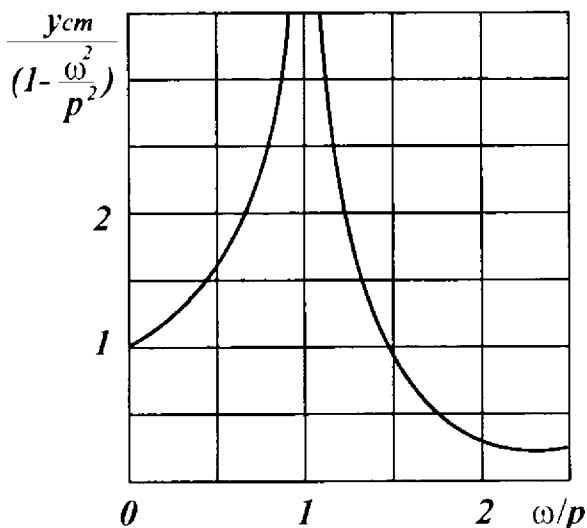


Рис.2.16 Зависимость $\frac{y_{cm}}{(1 - \omega^2/p^2)}$ от параметра ω/p

При $\omega > p_1$ в зарезонансной области амплитуда колебаний уменьшается и при $\omega > \sqrt{2}p_1$ второе слагаемое в выражении (2.56) становится меньше единицы. В этом случае упругая система не успевает среагировать на высокочастотные изменения силы ΔF_y и вызвать перемещение системы, равное статическому y_{cm} .

При прерывистом шлифовании на массу m действует импульс силы F_{y_0} в течение короткого промежутка времени τ .

Амплитуда колебаний определяется из уравнения (2.59) с учетом силы F_y

$$y = 2y_{cm} \sin \frac{p_1 \tau_1}{2} \sin p_1 \left(\tau - \frac{\tau_1}{2} \right), \quad (2.59)$$

где $y_{cm} = \Delta F_{y_0} / k$.

Максимальное значение y_{max} равно

$$y_{max} = 2y_{cm} \sin \frac{p_1 \tau_1}{2}. \quad (2.60)$$

Отношение y_{max}/y_{cm} носит название коэффициента динамичности μ и по данным [1] принимает следующие значения (табл. 2.3).

Т а б л и ц а 2.3

τ_1/T	0	0,01	0,02	0,03	0,05	0,1	0,15	0,25	0,5
μ	0	0,062	0,126	0,188	0,313	0,618	0,708	1,413	2,0

При малых значениях τ_1/T (меньше 0,15) коэффициент динамичности меньше единицы. Динамические перемещения в этой области меньше статических. С увеличением τ_1/T коэффициент дина-

мичности возрастает и при $\tau_1/T = 0,5$, $\mu = 2,0$. Динамика резания, как видно из приведенных данных, связана со временем контакта режущего инструмента с деталью.

Согласно зависимости (2.59) повысить точность можно за счет увеличения собственной частоты колебаний p_1 , уменьшая значение $\sin \frac{p_1 \tau_1}{2}$. С другой стороны, уменьшить τ_1 можно за счет увеличения скоростей движения детали или инструмента (в зависимости от вида обработки). Эффект снижения амплитуды колебаний (ниже статического значения) при $\tau_1/T < 0,15$ аналогичен эффекту снижения амплитуды колебаний в зарезонансной области $\omega > \sqrt{2} p_1$.

В работе [3] приведено решение, учитывающее многократность воздействия импульсов силы F_{y_0} на характер изменения колебаний массы m при прерывистом резании

$$y = \frac{S}{2m p_1} \left[\sin p_1 \tau + \operatorname{ctg} \left(\frac{\pi p_1}{\omega} \right) \cos p_1 \tau \right], \quad (2.61)$$

где $S = \int_0^{\tau_1} F_{y_0} d\tau = F_{y_0} \tau_1$ – импульс силы, ω – частота следования импульсов.

импульсов.

Зависимость (2.61) справедлива в интервале $\tau_1 = 0$ до $\tau_1 = 2\pi/\omega$.

В других интервалах закономерность изменения "у" повторяется. Амплитуда колебаний определяется по формуле

$$A = \frac{S}{m p_1} \sqrt{1 + \operatorname{ctg}^2 \left(\frac{\pi p_1}{\omega} \right)} = \frac{S}{2m p_1 \left| \sin \frac{\pi p_1}{\omega} \right|}. \quad (2.62)$$

Дробь $\frac{S}{m p_1}$ характеризует величину максимального отклонения,

вызванную однократным воздействием импульса силы. Коэффициент β отражает влияние многократного воздействия импульсов силы

$$\beta = \frac{1}{2 \left| \sin \frac{\pi p_1}{\omega} \right|}. \quad (2.63)$$

Из выражения (2.63) следует, что при $\beta_{\min} = 0,5$ и $\sin \frac{\pi p_1}{\omega} = 1$ амплитуда колебаний A_{\min} имеет минимальное значение

$$A_{\min} = 0,5 A_{cm} \tau_1 p_1, \quad (2.64)$$

где $y_{cm} = \Delta F_{y_0} / k$ – перемещение массы m , соответствующее статическому приложению силы F_{y_0} .

С учетом $p_1 = \frac{2\pi}{T}$ зависимость (2.64) примет вид

$$A_{\min} = A_{cm} \frac{\pi \tau_1}{T}, \quad (2.65)$$

где T – период собственных колебаний.

Период собственных колебаний зависит от жесткости упругой системы. С уменьшением жесткости упругой системы период собственных колебаний возрастает. С уменьшением τ_1 можно существенно уменьшить амплитуду колебаний A_{\min} . Это уменьшение эквивалентно повышению динамической жесткости упругой системы. Следовательно, при кратковременном действии импульсов (продолжительностью τ_1) можно практически исключить упругие перемещения системы, повышая тем самым точность обработки.

Данный эффект реализуется при прерывистом шлифовании.

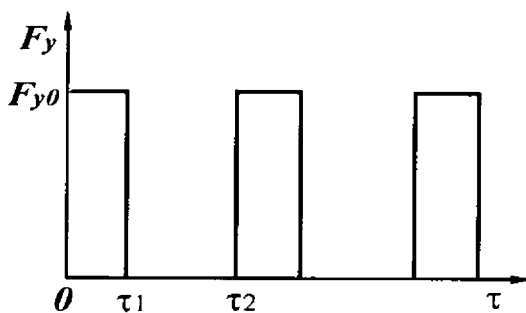


Рис. 2.17. Изменение силы $F(\tau)$

В работе [8] приведено аналитическое решение, позволяющее определять колебания при прерывистом шлифовании. Движение массы m обрабатываемой детали на участке действия импульса силы $(0, \tau_1)$ (рис. 2.17) описывается дифференциальным уравнением

$$m\ddot{y} + ky = F_{y_0}, \quad (2.66)$$

а на участке $(\tau_1; \tau_2)$, где $\tau_2 = T_1$ описывается уравнением

$$m\ddot{y} + ky = 0. \quad (2.67)$$

Решение этих уравнений имеет вид

$$y_1 = A \sin p_1 \tau + B \cos p_1 \tau + y_{cm}, \quad (2.68)$$

$$y_2 = C \sin p_1 \tau + D \cos p_1 \tau, \quad (2.69)$$

где $y_{cm} = \Delta F_{y_0} / k$; $p_1 = \sqrt{\frac{k}{m}}$ – собственная частота системы.

Неизвестные A, B, C, D определяются из начальных условий

$$\begin{aligned} y_1(0) &= y(\tau_2) \\ \dot{y}_1(0) &= \dot{y}(\tau_2), \end{aligned} \quad (2.70)$$

$$\begin{aligned} y_1(\tau_1) &= y(\tau_2) \\ \dot{y}_1(\tau_1) &= \dot{y}(\tau_2). \end{aligned} \quad (2.71)$$

Удовлетворив решения (2.68) и (2.69) условиям (2.70), (2.71), определены неизвестные постоянные

$$C = y_{cm} \frac{\sin p_1 \frac{\tau_1}{2} \sin p_1 \frac{(\tau_1 + \tau_2)}{2}}{\sin p_1 \frac{\tau_2}{2}}, \quad (2.72)$$

$$\begin{aligned} D = & \frac{y_{cm} \sin p_1 \frac{\tau_1}{2}}{\cos p_1 \frac{(\tau_2 + 2\tau_1)}{2} \sin p_1 \frac{\tau_2}{2}} \times \left(\cos \frac{\tau_1}{2} - \right. \\ & \left. - \sin p_1 \frac{(\tau_1 + \tau_2)}{2} \sin p_1 \frac{(\tau_2 + 2\tau_1)}{2} \right), \end{aligned} \quad (2.73)$$

$$A = C \cos p_1 \tau_2 + D \sin p_1 \tau_2, \quad (2.74)$$

$$B = C \sin p_1 \tau_2 + D \cos p_1 \tau_2 - y_{cm}. \quad (2.75)$$

Из (2.73) и (2.74) следует, что при $\sin p_1 \frac{\tau_2}{2} = 0$ и $\cos p_1 \frac{(\tau_2 + 2\tau_1)}{2} = 0$ постоянные A, B, C, D стремятся к бесконечности. Это означает, что при этих условиях в системе наступает резонанс (параметры $y_1, y_2 \rightarrow \infty$).

Условия резонанса:

1. $\sin p_1 \frac{\tau_2}{2} = 0$, откуда $p_1 \frac{\tau_2}{2} = \pi n$, где $n = 1, 2, \dots, \infty$ и $\tau_2 = \frac{2\pi n}{p_1}$.
2. $\cos p_1 \frac{(\tau_2 + 2\tau_1)}{2} = 0$, откуда $p_1 \frac{(\tau_2 + 2\tau_1)}{2} = \frac{\pi}{2} + \pi n$, $n = 1, 2, \dots, \infty$ и $\tau_2 + 2\tau_1 = \frac{2\pi(1 + 2n)}{p_1}$.

Из условий (2.74) и (2.75) следует, что существует бесконечное множество резонансных состояний системы, которые зависят от параметров τ_1 и τ_2 (продолжительность контакта режущего выступа и времени прерывания процесса шлифования).

Это указывает на то, что процесс прерывистого шлифования имеет множество неустойчивых областей и требует правильного выбора параметров τ_1 и τ_2 , определяемых исходя из условия обеспечения оптимальной амплитуды колебаний.

Регулировать устойчивость процесса прерывистого шлифования можно также за счет параметра $p_1 = \sqrt{\frac{k}{m}}$ путем изменения конструкции шпиндельного узла. Следует отметить, что рассмотренное решение получено без учета диссипативных сил.

2.7. ФОРМИРОВАНИЕ ТОЧНОСТИ ОБРАБОТКИ

При изготовлении деталей после каждого прохода резца погрешность заготовки уменьшается пропорционально уточнению

$$\varepsilon = \frac{\Delta_{исх.заг}}{\Delta_{обр.заг}}, \quad (2.76)$$

где $\Delta_{исх.заг}$ – погрешность исходной заготовки; $\Delta_{обр.заг}$ – погрешность заготовки после удаления очередного припуска.

Величина, обратная уточнению k_y , называется коэффициентом уменьшения погрешности

$$k_y = \frac{\Delta_{обр.заг}}{\Delta_{исх.заг}} = \frac{1}{\xi}.$$

В процессе изготовления детали уточнение всегда больше единицы $\xi > 1$. Исключением из данного условия является операция химико-термической обработки, при выполнении которой за счет возникающих деформаций точность обработки ухудшается $\xi < 1$.

Например, суммарное уточнение

$$\xi = \frac{\Delta_{заг}}{\Delta_{дет}} = 27.$$

Из данного выражения следует, что деталь должна быть точнее заготовки в 27 раз.

Обеспечить повышение точности в 27 раз за один проход практически не представляется возможным. Поэтому при разработке технологического процесса общий припуск удаляется за несколько операций: черновая, получистовая, чистовая, отделочная. Общее уточнение будет равно произведению уточнений на отдельных операциях

$$\xi = \xi_1 \cdot \xi_2 \cdot \xi_3 = \frac{\Delta_1}{\Delta_2} \cdot \frac{\Delta_2}{\Delta_3} \cdot \frac{\Delta_3}{\Delta_4} = 3^3.$$

Погрешность исходной заготовки можно представить в виде

$$\Delta_{исх.заг} = 2(t_{\max} - t_{\min}), \quad (2.77)$$

где t_{\max} , t_{\min} – предельные колебания глубин резания при обработке.

Погрешность обрабатываемой заготовки определяется из выражения

$$\Delta_{обр.заг} = 2 \frac{(F_{y \max} - F_{y \min})}{k}, \quad (2.78)$$

где k – жесткость упругой системы станка.

$$\begin{aligned}
 F_{y \max} &= C_y S^{y_p} t_{\max}^{x_p} V^n \\
 F_{y \min} &= C_y S^{y_p} t_{\min}^{x_p} V^n.
 \end{aligned}
 \tag{2.79}$$

После подстановки (2.77), (2.78) и (2.79) в выражении (2.76) получим

$$\varepsilon = \frac{(t_{\max} - t_{\min})k}{C_y S^{y_p} V^n (t_{\max}^{x_p} - t_{\min}^{x_p})},$$

при $x_p = 1$

$$\varepsilon = \frac{k}{C_y S^{y_p} V^n} = \frac{\Delta_{\text{исх.заг}}}{\Delta_{\text{обр.заг}}}.
 \tag{2.80}$$

Откуда

$$\Delta_{\text{обр.заг}} = \frac{C_y S^{y_p} V^n \Delta_{\text{исх.заг}}}{k}.$$

После первого прохода

$$\Delta_{\text{обр.заг}_1} = \frac{\Delta_{\text{исх.заг}}}{\varepsilon} = \frac{\Delta_{\text{исх.заг}} C_y S^{y_p} V^n}{k},$$

после второго прохода

$$\Delta_{\text{обр.заг}_2} = \frac{\Delta_{\text{исх.заг}}}{\varepsilon^2} = \frac{\Delta_{\text{исх.заг}} (C_y S^{y_p} V^n)^2}{k^2},$$

после i -го прохода

$$\Delta_{\text{обр.заг}_i} = \frac{\Delta_{\text{исх.заг}}}{\varepsilon^i} = \frac{\Delta_{\text{исх.заг}} (C_y S^{y_p} V^n)^i}{k^i}.
 \tag{2.81}$$

Из полученного выражения (2.81) следует, что после каждого прохода погрешность заготовки уменьшается обратно пропорционально уточнению ε и жесткости k . При обработке заготовок при $\varepsilon > 1$ с увеличением числа ходов инструмента повышается точность обработки. Однако, в тех случаях, когда $\varepsilon < 1$ (например, при малой

жесткости технологической системы), каждый новый ход будет не только повышать точность обрабатываемой заготовки, но даже снижать ее [7]. В качестве примера можно привести обтачивание длинного вала малого диаметра на станке малой жесткости. В этом случае при каждом новом ходе обточки вала погрешность формы заготовки, равная удвоенному прогибу (т. е. $\Delta D = 2Y_{\max}$) не только не уменьшается, но даже возрастает. Смещение вала в точке, расположенной на расстоянии x от передней бабки, определяется по формуле

$$y = F_y \left[\frac{1}{k_{\text{суп}}} + \left(1 - \frac{x}{l}\right)^2 \frac{1}{k_{\text{пб}}} + \left(\frac{x}{l}\right)^2 \frac{1}{k_{\text{зб}}} \right]. \quad (2.82)$$

Наибольший прогиб самого вала при положении резца по середине равен

$$y_{\text{заг}} = \frac{F_y l^3}{48Ej}, \quad (2.83)$$

где l – длина вала; E – модуль упругости; j – момент инерции сечения заготовки (для круглого вала $j = 0,05D^4$).

Жесткость вала при положении резца на его середине равна

$$k_{\text{заг}} = \frac{48Ej}{l^3}, \quad (2.84)$$

а жесткость вала при положении резца на расстоянии x от передней бабки станка

$$k_{\text{заг}} = \frac{3Ejl}{\left[x^2(l-x)^2\right]}. \quad (2.85)$$

На основании формул (2.82) и (2.83) отжатие вала, установленного в центрах шлифовального или токарного станка при нахождении шлифовального круга или резца на расстоянии x от переднего центра, определяется по формуле

$$y_{\text{заг}} = C_y S^{y_p} t^{x_p} V^n \left[\left(\frac{l-x}{l}\right)^2 \frac{1}{k_{\text{пб}}} + \frac{x^2}{l^2} \frac{1}{k_{\text{зб}}} + \frac{x^2(l-x)^2}{3Ejl} + \frac{1}{k_{\text{суп}}} \right]. \quad (2.86)$$

Из формулы (2.86) следует, что при обработке вала в центрах жесткость технологической системы по длине обрабатываемого вала не остается постоянной: это вызывает изменение величины отжата технологической системы, а следовательно, и формы заготовки. При постоянной глубине шлифования, установленной по лимбу станка ($t_{\text{л}} = \text{const}$), фактическая глубина t_q на втором проходе будет больше на величину отжата y' по сравнению с первым проходом. Следовательно, при каждом новом проходе при шлифовании с одинаковой подачей круга на глубину происходит нарастание отжата заготовки, а следовательно, и увеличение погрешности формы заготовки.

Поскольку отжатие упругой технологической системы численно равно приращению размера обрабатываемой заготовки, а произведение $t^{x_p} S^{y_p} V^n$ характеризует производительность обработки, то можно сделать вывод, что жесткость технологической системы определяет связь между точностью и производительностью обработки.

$$y = \frac{1}{k} c_p t^{x_p} S^{y_p} V^n. \quad (2.87)$$

В формуле (2.87) податливость $1/k = \omega$ выступает в качестве коэффициента пропорциональности между производительностью и погрешностью обработки.

Профессор А. П. Соколовский показал, что при токарной обработке заготовок быстрорежущими резцами машинное время обратно пропорционально корню квадратному от жесткости упругой системы \sqrt{k} . Следовательно, с увеличением жесткости в четыре раза машинное время обработки уменьшается в два раза.

Следовательно, для повышения точности обработки надо уменьшать величину упругих отжатий технологической системы посредством повышения ее жесткости.

Жесткость технологической системы повышают:

1. Созданием более жестких конструкций, приспособлений и инструментов.

2. Путем сокращения общего числа звеньев технологической системы.

3. Повышением контактной жесткости соприкасающихся отдельных поверхностей элементов упругой системы.

2.8. ВЛИЯНИЕ ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА ТОЧНОСТЬ ДЕТАЛЕЙ

Для увеличения твердости материала деталей применяется термическая обработка, основными видами которой являются нормализация, закалка, отпуск и обработка холодом.

Нормализация предназначена для улучшения обрабатываемости, снятия напряжений. Закалка служит для получения высокой твердости поверхностей деталей и улучшения физико-механических свойств стали. Низкий отпуск до температур $150 - 200^\circ\text{C}$ уменьшает внутренние остаточные напряжения и увеличивает вязкость материала. Обработка холодом служит для стабилизации свойств и размеров, повышает твердость и износостойкость.

Химико-термическая обработка деталей имеет целью повысить твердость и износостойкость поверхностей деталей. Наиболее распространенным видом химико-термической обработки является цементация (в твердом или жидком карбидизаторе или газовая). Процесс характеризуется насыщением поверхностного слоя детали углеродом на глубину $1 - 1,8$ мм. Последующая термическая обработка (закалка) повышает твердость, износостойкость и контактную выносливость.

Влияние химико-термической обработки на точность рассмотрим на примере технологии изготовления зубчатых колес.

Рассмотрим кинетику формирования точности зубчатых колес ($m_n = 3$ мм, $z = 49$, $\beta = 20^\circ 21' 50''$, $b = 36$ мм), изготовленных из стали 12Х2Н4А.

Нарезание зубчатого венца производилось на зубофрезерном станке 5Е32 стандартной однозаходной червячной фрезой ($m_n = 3$, $\alpha = 20^\circ$, $D_{фр} = 80$ мм, $Z_{фр} = 13$, $\beta' = 2^\circ 22'$) из стали Р18 на режимах: скорость резания 26,9 м/мм, продольная подача 0,8 мм/об.стола.

Режимы химико-термической обработки приведены в табл. 2.4.

Твердость цементированных поверхностей HRC 60 – 62, твердость сердцевины HRC 32 – 42.

После химико-термической обработки шлифовались наружный диаметр и торцы колеса с выверткой по отверстию. При обработке отверстия базирование производилось по окружности выступов.

Таблица 2.4

Вид обработки	Температура °С	Выдержка в час
1. Нормализация	900 ± 10	2
2. Закалка	870 ± 10	2
3. Отпуск	500 ± 50	2
4. Цементация в твердом карбидизаторе	900 ± 10	13
5. Высокий отпуск	650 ± 10	2
6. Закалка	790 ± 20	1,5
7. Обработка холодом	-70	2
8. Отпуск	160 ± 10	2,5

После фрезерования зубьев, химико-термического упрочнения и окончательной обработки комплекта основных конструкторских баз контролировались нормалеммером, длина общей нормали W_m , на зубоизмерительном приборе фирмы Цейс – радиальное биение зубчатого венца F_{rr} , на ходомере фирмы Мичиган Тул – погрешность направления зуба. Контролировались также предельное отклонение шага f_{pr} , наибольшая разность соседних шагов V'_{pr} , наибольшая разность шагов V_{pr} и накопленная погрешность шага F_{pr} .

От операции к операции наблюдается увеличение средней погрешности, что свидетельствует о снижении точности зубчатых колес и увеличении рассеяния, характеризующего точность выполнения операции.

В табл.2.5 представлены значения показателей точности зубчатого венца, вычисленные по результатам измерений погрешностей.

Из табл. 2.5 видно, что по мере приближения к завершающей стадии обработки точность зубчатых колес снижается.

Нагрев зубчатых колес до высоких температур, резкие охлаждения, возникновение структурных превращений вызывают появление тепловых и структурных напряжений и, как следствие, деформацию в радиальном направлении зубчатого венца, искажение профилей зубьев, нарушение плоскостности базового торца.

После химико-термической обработки необходимо производить восстановление установочных баз. При восстановлении установочных баз, как видно из табл. 2.5, не всегда удается повысить точность

взаимного расположения основной конструкторской установочной базы и диаметра делительной окружности зубчатого венца.

Т а б л и ц а 2.5

Показатели точности зубчатого венца	Стадии обработки	Размах R	Среднее значение мкм $\bar{x} \pm \Delta x$	Поле рассеяния 6σ	Степень точности по ГОСТ 1643-72
1	2	3	4	5	6
Радиальное биение F_{rr}	зубофрезер. цементация закалка восстановление баз	58	$42,7 \pm 6,2$	89,5	9,2
		66	$44,6 \pm 7,9$	112,5	9,8
		60	$62,3 \pm 6,8$	96,0	10,2
		83	$75,8 \pm 9,8$	143,4	11,4
Колебание длины осей нормали, V_{wr}	зубофрезер. цементация закалка	25	$16,0 \pm 5,8$	42,4	7,3
		25	$20,4 \pm 5,6$	37,5	7,2
		35	$31,7 \pm 6,2$	54,3	9,0
Накопленная погрешность шага F_{pr}	зубофрезер. цементация закалка восстановление баз	85	$58,6 \pm 8,3$	119,1	9,0
		100	$54,0 \pm 10,6$	154,7	9,3
		87	$71,4 \pm 9,2$	133,8	9,5
		126	$95,3 \pm 14,3$	211,2	10,3
Погрешность направления зуба $F_{\beta r}$	зубофрезер. цементация закалка восстановление баз	32	$29,5 \pm 3,9$	4,87	9,6
		50	$55,7 \pm 5,8$	81,4	10,8
		66	$67,3 \pm 8,2$	118,9	11,4
		118	$79,2 \pm 15,0$	220,9	12,3
Предельное отклонение шага f_{ptr}	зубофрезер. цементация закалка восстановление баз	13	$10,8 \pm 2,4$	20,9	7,4
		11	$10,3 \pm 2,2$	14,5	7,1
		14	$15,9 \pm 2,4$	20,8	8,1
		18	$17,3 \pm 2,8$	27,5	8,6

На операцию зубошлифования часто поступают колеса, имеющие 10 – 11-ю степень точности. При этих условиях на операцию зубошлифования, кроме основной функции – обеспечения требуемой

точности, возлагается несвойственная ей функция – удаление увеличенного припуска, компенсирующего погрешности химико-термической обработки. Увеличенные припуски, неравномерно распределенные на рабочих боковых поверхностях зубьев, вызывают появление различных по величине остаточных напряжений и появление шлифовочных прижогов. Величина растягивающих напряжений в ряде случаев превышает предел прочности материала. При этих условиях на поверхности появляются шлифовочные трещины. Наличие прижогов на боковых поверхностях зубьев снижает долговечность колес в 5 – 8 раз [65].

2.9. УПРАВЛЕНИЕ ТОЧНОСТЬЮ ПРОЦЕССА ОБРАБОТКИ

Точность и надежность металлорежущих станков тесно связаны с протекающими в них тепловыми процессами. Нагрев узлов станка неизбежно приводит к температурным деформациям, при которых изменяются не только линейные размеры деталей, но и форма поверхностей и их расположение. Следует отметить, что даже незначительная избыточная температура вызывает весьма существенные деформации. Например, ходовой винт длиной 1000 мм при нагревании на 1 градус удлиняется на 11,5 мкм [9].

Нестабильный тепловой режим металлорежущего станка неблагоприятно отражается, во-первых, на точности обрабатываемых деталей, во-вторых, на работоспособности узлов. Например, температурные деформации колонны плоскошлифовального станка с вертикальным расположением шпинделя приводят к отклонению от перпендикулярности оси шпинделя к плоскости стола. При перепаде температур $\Delta\theta = 4 \div 5^\circ\text{C}$ изменение углового положения оси шпинделя составляет примерно 0,1 мм на 1000 мм длины. Вследствие этого отклонение от параллельности торцов обрабатываемой детали достигает 0,012 мм на длине, равной 300 мм [10]. Особенно чувствительны к температурным деформациям станки с ЧПУ, которые по сравнению с универсальными более энергоемки, а доля машинного времени у них достигает 70 – 90%. В этих станках до 50% подводимой энергии вследствие технических и электрических потерь превращается в тепловую.

Установлено, что вклад тепловых деформаций в общий баланс погрешностей обработки в станках с ЧПУ может достигать до 30 – 70%. Кроме того, температурные деформации влияют на долговечность узлов станка. Температурные смещения узлов станка вызывают погрешности размеров формы и расположения обрабатываемых поверхностей (табл. 2.6) [10].

Т а б л и ц а 2.6

Детали и узлы станка	Линейные и угловые смещения	Отклонения обрабатываемых поверхностей	Величина погрешности
Шпиндель токарно-револьверного станка 1А 425 Станина и передняя бабка токарного станка	$\Delta_y = 90$ мкм $\Delta_x = 108$ мкм —	Погрешность диаметрального размера Седлообразность Уменьшение диаметра	— 0,15 мм/м 0,008...0,05 мм
Колонна и шпиндельная головка фрезерного станка 6А75В	$\beta = 54,3$ мкрад	Конусообразность отклонения от параллельности	$\frac{0,006...0,036}{300}$ 9,5 мкм
Шпиндель вертикально-фрезерного станка 6520Ф3	$\Delta_y = 59...$...96 мкм	—	—
Колонна расточного станка	$\Delta_x = 123$ мкм $\Delta_y = 138$ мкм $\beta = 1,23 \cdot 10^{-4}$ град	Отклонение от параллельности осей отверстий	0,12 мм/м
Шпиндель отделочно-расточных станков 2706В, 2714В	$\Delta_y = 35$ мкм $\Delta_x = 25$ мкм	Отклонение от соосности и параллельности	—
Шпиндельный узел координатно-расточного станка	$\Delta_y = 75$ мкм $\Delta_x = 35$ мкм	Отклонение от соосности отверстий	14 мкм
Шпиндель торцешлифовального станка	$\Delta_y = 30$ мкм $\Delta_x = 10$ мкм	Отклонение от плоскости	0,12 мкм 0,63 мкм

Отклонение шпинделя станка от температурных деформаций является величиной переменной, зависящей от частоты вращения шпинделя, времени работы и условий эксплуатации. Например, при непрерывной работе токарно-револьверного станка в течение 6 часов при частоте вращения 100 об/мин отклонение шпинделя составляет $\Delta_y = 80$ мкм, а при частоте вращения 630 об/мин – $\Delta_y = 96$ мкм.

Температурные деформации быстро возрастают на начальном этапе обработки. Затем темп нарастания деформаций замедляется. Наступает установившийся режим работы. После остановки температурные деформации уменьшаются и станок возвращается в исходное состояние.

Таким образом, температурные деформации станков обратимы.

Установлено, что температурные деформации составляют одну из основных долей в общем балансе погрешностей. Поэтому технологическую надежность станков с ЧПУ определяют именно с учетом этих погрешностей. Под технологической надежностью понимают способность станков выполнять обусловленные его назначением операции, обеспечивая при этом заданную точность размеров, формы и расположения поверхностей. Уровень технологической надежности оценивают запасом станка по точности обработки δ_T , который рассчитывается по формуле

$$\delta_T = TL - \Delta_{пр} - \Delta_{ст},$$

где TL – поле допуска; $\Delta_{пр}$ – погрешность программирования; $\Delta_{ст}$ – общая погрешность обработки на станке в период между настройками станка на размер.

Для обеспечения требуемой точности обработки недостаточно осуществить правильный расчет и настройку станка. Под влиянием переменных погрешностей, связанных с износом и затуплением инструмента и нагреванием элементов упругой системы, происходит смещение поля рассеяния размеров обрабатываемых заготовок внутри поля допуска из положения «а» в положение «б» (рис. 2.18) и через некоторый промежуток времени τ_2 обработки возникает опасность выхода части заготовок за пределы поля допуска. Для предотвращения появления брака необходимо через определенный промежуток времени τ_2 произвести поднастройку станка.

Поднастройкой (подналадкой) станка называется процесс восстановления первоначальной точности взаимного расположения инструмента и обрабатываемой заготовки, нарушенного в процессе обработки партий заготовок.

При обработке валов для компенсации влияния износа резца, вследствие его затупления и увеличения упругих отжатий в технологической системе, производят перемещение резца на величину, равную половине смещения вершины кривой рассеяния ($A \approx A_1 / 2$) [2], вызванного воздействием переменных погрешностей (рис. 2.18). В результате такой поднастройки поле рассеяния размеров заготовок возвращается из положения «б» в положение «а» и опасность появления брака устраняется.

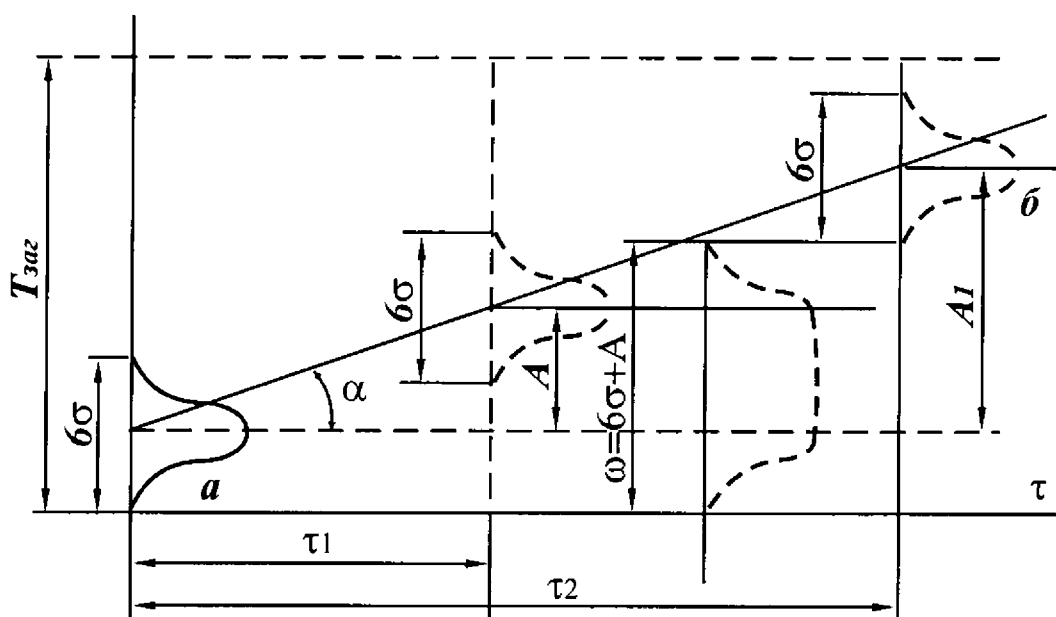


Рис. 2.18. Влияние переменных систематических погрешностей на форму и положение кривой рассеивания (Б.С. Балакшин)

Однако поднастройка станка, осуществляемая рабочим-настройщиком вручную, требует остановки станка и прекращения обработки на весь период поднастройки, продолжительность которой достаточно велика.

Повышение производительности обработки достигается уменьшением простоев при настройке и поднастройке, а также увеличением продолжительности работы станка между поднастройками.

Существует противоречие между требованиями повышения точности и производительности обработки. Обеспечение точности дос-

стигается сокращением продолжительности работы станка между поднастройками, а увеличение производительности, наоборот, требует уменьшения простоев станка и увеличения продолжительности их работы между поднастройками. Устранение указанного противоречия достигается путем автоматизации контроля размеров обрабатываемых заготовок и автоматизации самого процесса обработки.

Адаптивное управление точностью обработки основано на принципе компенсации упругих отжатий в технологической системе, вызванных колебаниями припуска и твердости материала заготовки.

Отжатие шпинделя в упругой технологической системе определяется отношением нормальной составляющей усилия резания к жесткости k технологической системы $y = F_y/k$. Погрешность обработки зависит от колебаний величины деформации от изменяющейся силы резания. Для обеспечения требуемой точности необходимо обеспечить постоянство величины отжатия y . Это условие обеспечивается при постоянстве силы F_y .

В работах проф. Б.С. Балакшина [11] указывается, что для поддержания постоянства силы F_y следует использовать в качестве параметра управления продольную подачу станка. Управление подачей рабочий может осуществлять вручную или с помощью системы автоматического регулирования. Подача может изменяться дискретно или непрерывно и автоматически. При ручном изменении подачи рабочий наблюдает за отключением стрелки прибора и вносит требуемые изменения в величину подачи до тех пор, пока стрелка прибора не возвратится в исходное положение. При автоматическом регулировании подачи эти функции выполняет САР (система автоматического регулирования). В этих условиях при обработке заготовки с величиной припуска, превышающего предельно допустимую величину, автоматически уменьшается величина продольной подачи, а при обработке заготовок с малыми припусками, наоборот, подача увеличивается.

На рис. 2.19 приведены результаты обработки стальных заготовок с твердостью 145 – 165 НВ на токарно-винторезном станке 1А62. Проходным резцом с углом $\varphi = 45^\circ$ с пластиной Т15К6 при скорости резания 45 м/мин обрабатывались валы $\varnothing 59,5 - 0,2$ мм. Припуск на сторону вала изменялся в пределах 2 мм. Первые девять заготовок (1 – 9) обрабатывались с постоянной подачей $S = const = 0,244$ мм/об (участок 1), а последующие девять – (10–18) с подачей, устанавли-

ваемой с учетом фактического припуска на обработку. Поле рассеивания размеров заготовок, обрабатываемых с постоянной подачей $S=0.24$ мм/об, как установлено в работе [7], составляет $\omega_{заг}=0,155$ мм, а после обработки с дискретно регулируемой подачей – $\omega_{заг}=0,045$ мм. Поле рассеивания размеров уменьшилось в 3,445 раза.

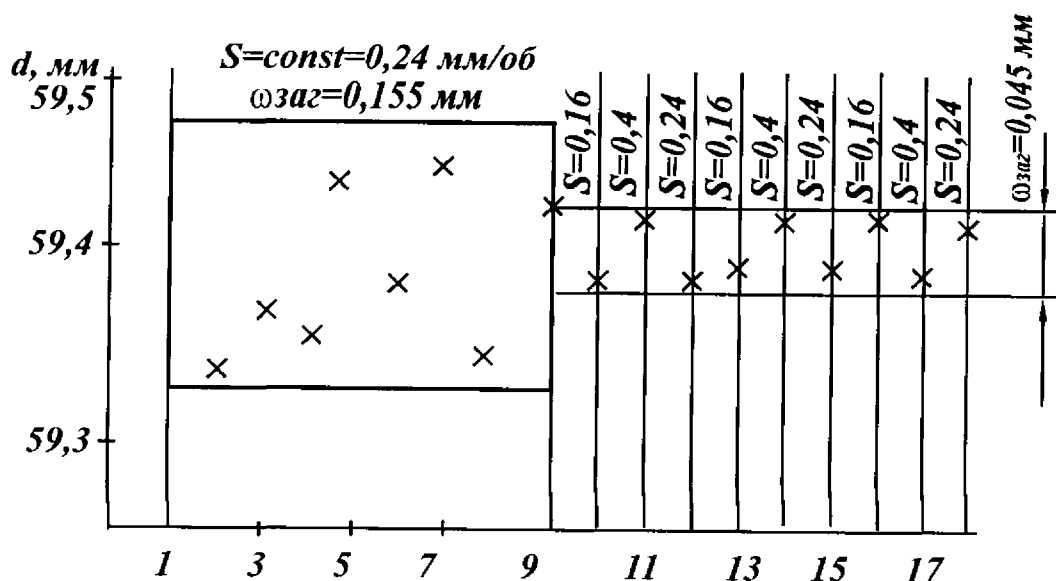


Рис. 2.19. Стабилизация точности размера заготовки, обрабатываемой на токарном станке путем изменения подачи (Б.С. Балакшин)

Приведенные данные показывают, что управление упругими перемещениями путем изменения продольной подачи позволяет:

1. Существенно повысить точность обрабатываемых деталей за счет уменьшения поля рассеяния размеров, порождаемого совокупным действием различных случайных факторов.

2. Увеличить производительность обработки за счет применения более форсированных режимов резания.

К недостаткам метода управления податливостью упругой системы следует отнести изменение в широких пределах шероховатости поверхности.

Известно, что при увеличении продольной подачи шероховатость обрабатываемой поверхности возрастает, следовательно, стабилизация усилий резания за счет изменения продольной подачи вызывает неоднородность шероховатости поверхности.

Следует, однако, заметить, что этот недостаток в ряде случаев не является существенным, так как ответственные детали после черно-

вых и чистовых операций проходят более тонкую доводочную обработку. Системы автоматического управления точности обработки нашли применение в ряде конструкций станков.

Например, системой автоматического управления САУ оснащены зубошлифовальные станки типа 5М851 [32]. В качестве регулируемого параметра на этих станках используется мощность, затрачиваемая на резание. В качестве регулирующего параметра используется продольная подача стола станка. Блок-схема САУ представлена на рис. 2.20.

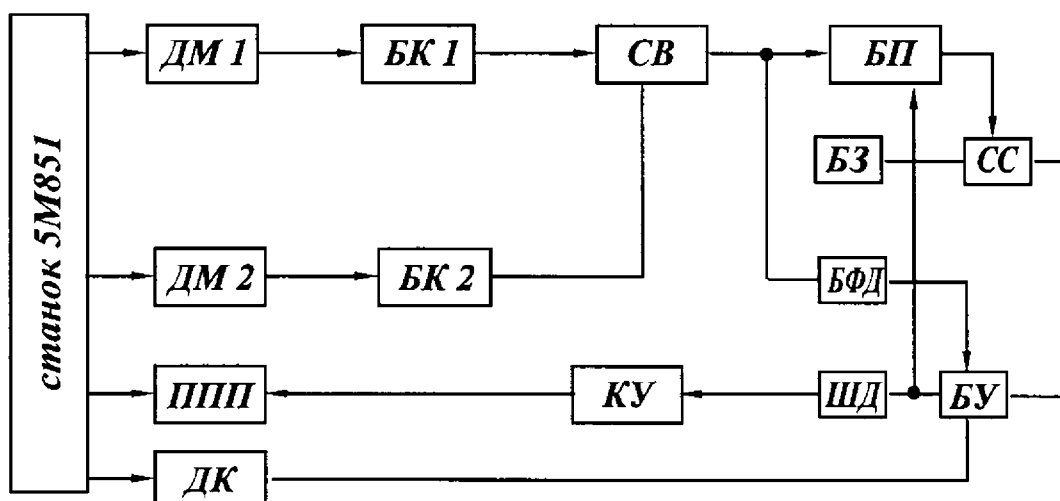


Рис. 2.20. Блок-схема САУ

Система содержит датчики активной мощности электродвигателей привода шлифовальных кругов ДМ1 и ДМ2 и соответствующие им блоки компенсации уровня мощности холостого хода БК1 и БК2, схему выбора наиболее нагруженного электродвигателя привода шлифовального круга СВ, блок памяти БП, блок задания БЗ, схему сравнения СС, блок фиксации резания БФР, блок управления БУ, шаговый двигатель ШД, корректирующее устройство КУ, датчик касания ДК и привод продольной подачи ППП.

Информационный сигнал поступает с датчика мощности наиболее нагруженного электродвигателя привода шлифовального круга. В систему выбора наибольшего сигнала входит логический элемент ИЛИ. Блок памяти содержит реверсивный счетчик импульсов, схему управления и цифровой аналоговый преобразователь. Система работает следующим образом. При врезании круга в деталь появляется сигнал на выходе блока фиксации резания БФР. По команде от блока управления БУ продольная подача резко уменьшается до минималь-

ной величины 150 мм/мин, а затем начинает плавно увеличиваться до тех пор, пока мощность, затрачиваемая на резание, не достигает уровня, заданного в блоке задания БЗ. Регулирующие воздействия в системе производятся в дискретные моменты времени с частотой следования импульсов от датчика ДК.

Для оценки эффективности работы зубошлифовальных станков, оснащенных САУ, зубчатые колеса с $m = 4$ мм, числом зубьев $z = 60$ шлифовались с автоматическим регулированием мощности, затрачиваемой на резание, и без него. Зависимость накопленной погрешности окружного шага зубчатых колес от числа проходов зубошлифования на станке 5851 без САУ и с САУ представлены на рис. 2.21.

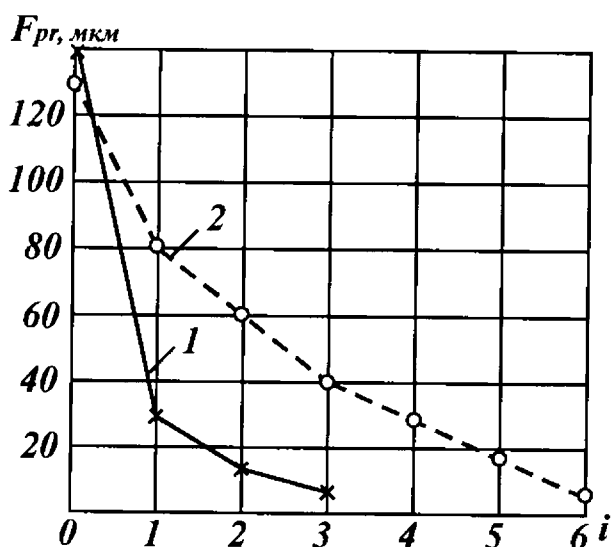


Рис.2.21. Зависимость накопленной погрешности окружного шага F_{pr} от числа проходов. Контурная линия шлифования с САУ, пунктирная – шлифование без САУ

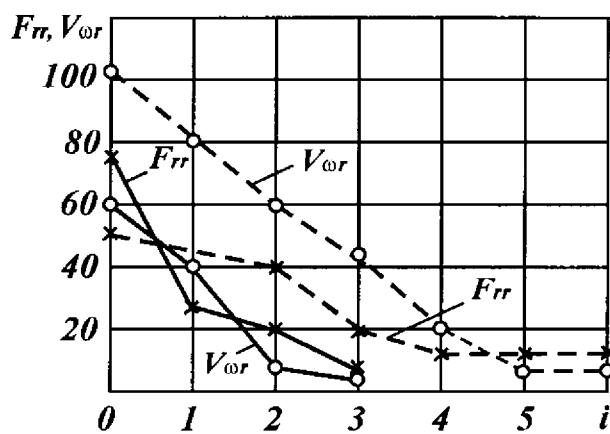


Рис. 2.22. Зависимость радиального биения F_{rr} и колебания длины общей нормали V_{wr} от числа проходов. Контурная линия шлифования с САУ, пунктирная – шлифование без САУ

Исходное до обработки отклонение наибольшей накопленной погрешности окружного шага F_{pr} изменялось в пределах 128 – 140 мкм. При обработке с САУ после первого прохода на режиме: $t = 0,07$ мм, подача S – регулируемая, погрешность F_{pr} уменьшилась с 128 мкм до 28 мкм. После третьего прохода погрешность F_{pr} уменьшилась до 3 – 4 мкм. При обработке зубчатых колес без САУ для уменьшения погрешности с 125 мкм до 3 – 4 мкм требуется шесть проходов.

Измерение радиального биения F_{rr} и колебаний длины общей нормали V_{wr} по проходам, представленное на рис. 2.22, наглядно свидетельствует о положительном влиянии автоматического регулирования на точность обработки зубчатых колес.

Например, известно [9], что при шлифовании зубчатых колес четвертой степени точности с числом зубьев 20, 30 и 60 на станках 5851, оснащенных САУ, машинное время зубошлифования, по сравнению с обработкой на станках без системы, уменьшилось соответственно с 100, 200, 500 мин до 80, 110, 220 мин.

Это объясняется тем, что увеличение припуска на отдельных зубьях, вызванное короблением и деформацией зубчатого венца в процессе термической обработки, требует значительного занижения режимов шлифования при обработке без САУ.

2.10. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТОЧНОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ МЕТОДОМ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ СТАТИСТИКИ

Расчетно-аналитический метод оценки точности обработки позволяет установить причины появления погрешностей обработки и установить функциональные зависимости точности изготовления деталей от технологических факторов.

Однако этот метод позволяет оценить точность в том случае, если технолог располагает необходимыми сведениями нормативного характера (например, жесткость узлов станка, геометрическая точность станка, погрешности установки и закрепления и т. д.).

На станках, настроенных на размер в массовом и крупносерийном производствах, оценку точности удобнее производить с использованием методов математической статистики и теории вероятности. Метод математической статистики учитывает одновременно влияние всей совокупности действующих факторов: неравномерность снимаемого припуска, износ инструмента, ошибки исполнителя, погрешности базирования и т. д. Оценку точности с использованием метода математической статистики следует производить в следующей последовательности:

1. Из числа обработанных на станке заготовок выбирается одновременная выборка объемом $n = 50...100$ штук деталей.

2. Производится измерение интересующего размера, например, диаметра вала $\varnothing 20_{-0,30}^{-0,1}$ мм. Цена деления измерительного прибора должна быть $\Delta = \left(\frac{1}{6} - \frac{1}{10}\right)T$, где T – допуск на изготовление детали.

3. Полученные результаты измерения представляются в виде возрастающего или убывающего ряда чисел с указанием частот или частостей.

Частотой m называется число появления какого-либо случайного события в n испытаниях. Например, при измерении размеров деталей диаметром $20_{-0,30}^{-0,1}$ мм в партии $n = 50$ частота появления размера 19,85 равна $m=12$.

Частостью m/n называется отношение частоты m случайного события к общему числу испытаний n . Например, частота появления случайного размера 19,85 мм равна 12, а частость $m/n=12/50=0,24$.

4. Определяется число интервалов, на которые необходимо разбить ряд чисел, полученных при измерении

$$f = \frac{\omega}{c},$$

где ω – размах размеров; c – цена интервала.

Число интервалов в зависимости от размера выборки изменяется от 5 до 15.

n	50	100	500	1000
f	5	10	13	15

5. Строят полигон и гистограмму рассеяния размеров. По мере уменьшения интервалов рассеяния размеров ломаная линия (полигон рассеяния размеров) приближается к плавной кривой (рис.2.23).

6. Определяют характеристики распределения. Они разделяются на меры положения и меры рассеяния.

К мерам положения относятся: среднее арифметическое значение и мода.

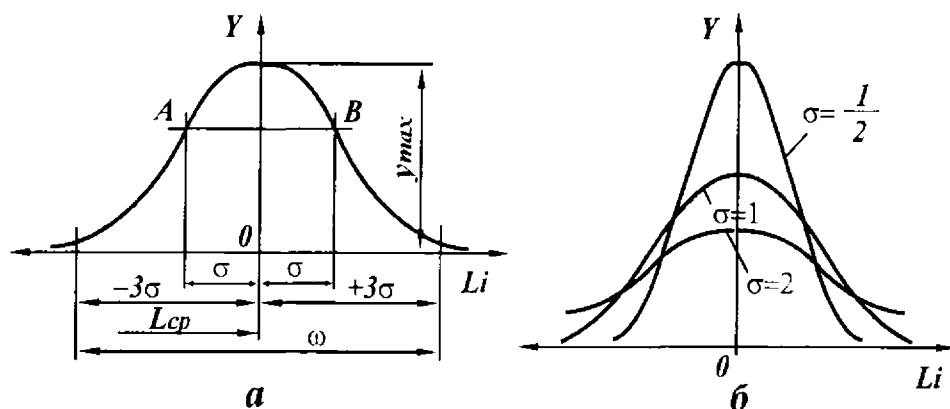


Рис.2.23. Кривая нормального распределения (кривая Гаусса) (а), влияние среднего квадратичного отклонения на форму кривой нормального распределения (б)

Среднее арифметическое значение \bar{x} – это устойчивая характеристика, которая при многократном ее определении повторяется. Она выражается следующей зависимостью:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

или

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^f x_i m_i$$

Модой называется значение случайной величины, которой соответствует наибольшая частота или частость. К мерам рассеяния относят размах ($x_{\max} - x_{\min}$) и дисперсию D .

Размах – маломощная характеристика, в статистике она не применяется, так как имеет минимальную частость.

Дисперсия – это квадрат среднеквадратичной величины

$$D_x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^f (x_i - \bar{x})^2 m_i$$

Дисперсия в технологических расчетах не применяется, так как имеет размерность площади мм^2 . Для оценки рассеяния размеров используют среднеквадратичное отклонение $\delta = +\sqrt{D_x}$.

Это чрезвычайно стабильный критерий, который характеризует форму кривой распределения случайных величин.

При анализе точности необходимо из общей совокупности погрешностей оценить поле рассеяния случайных погрешностей, определить систематическую погрешность и изыскать путь ее устранения. Случайные погрешности оцениваются с позиции теории вероятности. Вероятность события (A) равна отношению числа случаев, благоприятствующих появлению числа (A), к общему числу случаев n .

Например, при бросании монеты, вероятность появления орла или решки $P(A) = \frac{1}{2}$. При бросании шестигранного кубика вероятность появления события A $P(A) = \frac{1}{6}$.

Следует заметить, что в теории вероятности формула $P(A) = \frac{m}{n}$ справедлива при выполнении трех условий:

1. Равновозможность событий.
2. Независимость событий.
3. Несовместимость событий.

Однако в реальных условиях при наличии систематических погрешностей указанные условия не выполняются. Поэтому при анализе точности обработки пользуются не теоретической вероятностью, а статистической

$$P(k) = \frac{m}{N},$$

где N – число испытаний.

Например, при сверлении отверстия $\varnothing 10_{+0,1}^{+0,2}$ из 30 обработанных отверстий размер 10,12 составил 6 раз. Следовательно, статистическая вероятность появления размера 10,12 равна $P(k) = 6/30$.

Закон больших чисел Бернули, гласящий о том, что статистическая вероятность стремится к теоретической при $N \rightarrow \infty$, перебростил мостик между теорией и практикой

$$\frac{m}{N} \xrightarrow{N \rightarrow \infty} \frac{m}{n}.$$

При обработке заготовок рассеяние их истинных размеров подчиняется различным математическим законам. В технологии машиностроения практическое применение получили следующие законы: нормального распределения (закон Гаусса); равнобедренного треугольника (закон Симпсона); эксцентриситета (закон Релея); закон равной вероятности и функции распределения, представляющий собой композицию этих законов.

2.10.1. Закон нормального распределения (закон Гаусса)

Исследования профессоров А.Б.Яхина, А.А.Зыкова и других исследователей показали, что распределение действительных размеров заготовок, обработанных на станках, часто подчиняются закону нормального распределения (закону Гаусса).

Результирующая погрешность обработки обычно формируется в результате одновременного воздействия большого числа факторов, вызывающих погрешности, зависящие от станка, приспособления, инструмента и заготовки, которые по существу представляют собой независимые случайные величины, которые примерно одинаково влияют на общую суммарную погрешность. При этих условиях случайная результирующая погрешность подчиняется закону нормального распределения.

Уравнение кривой нормального распределения имеет следующий вид

$$y = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(L_i - L_{cp})^2}{2\sigma^2}}, \quad (2.88)$$

где σ – среднее квадратичное отклонение, определяемое по формуле

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^f (L_i - L_{cp})^2 \frac{m_i}{n}} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^f (L_i - L_{cp})^2 m_i},$$

L_i – текущий действительный размер; L_{cp} – среднее взвешенное арифметическое значение действительных размеров заготовок данной партии.

Значение L_{cp} определяется из выражения

$$L_{cp} = \sum_{i=1}^f L_i \frac{m_i}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^f L_i m_i,$$

где m_i – частота (количество заготовок данного интервала размеров); n – количество заготовок в партии.

Кривая, характеризующая закон нормального распределения, показана на рис. 2.23, а.

Анализ уравнения (2.88) показывает, что кривая нормального распределения симметрична относительно оси ординат. При $L_i = L_{cp}$ кривая имеет максимум, равный

$$y_{\max} = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \approx \frac{0,4}{\sigma}.$$

На расстоянии $\pm\sigma$ от вершины кривая имеет две точки перегиба (точки A и B). Ордината точек перегиба

$$y_A = y_B = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}l} = \frac{y_{\max}}{\sqrt{l}} \approx \frac{0,24}{\sigma}.$$

Кривая асимптотически приближается к оси абсцисс. На расстоянии $\pm 3\sigma$ от положения вершины кривой ее ветви так близко подходят к оси абсцисс, что в этих пределах оказывается 99,73% площади, заключенной между всей кривой нормального распределения и осью абсцисс.

При практических расчетах обычно принимают, что на расстоянии $\pm 3\sigma$ от вершины кривой нормального распределения ее ветви пересекаются с осью абсцисс. Если принять площадь, ограниченную полем рассеяния размеров $\pm 3\sigma$, за 100%, то возникающая при этом погрешность составляет 0,27%. При увеличении σ ордината y_{\max} уменьшается, а поле рассеяния $\omega = 6\sigma$ возрастает. В результате кривая становится более полой и низкой (рис. 23, б).

Среднее квадратичное отклонение σ является мерой точности.

2.10.2. Закон равнобедренного треугольника (закон Симпсона)

При обработке заготовок 7 и 8 квалитетов точности, распределение их размеров в большинстве случаев подчиняется закону Симпсона, который графически выражается равнобедренным треугольником с полем рассеяния

$$\omega = 2\sqrt{6}\sigma \approx 4,9\sigma.$$

2.10.3. Закон эксцентриситета (закон Релея)

Такие параметры точности, как эксцентриситет, биение, разностенность, непараллельность, неперпендикулярность, овальность, конусообразность подчиняются закону распределения эксцентриситета (закону Релея). Такое распределение формируется тогда, когда случайная величина R является радиусом-вектором при двумерном распределении координат проекций x и y (рис. 2.24, а).

Результирующая погрешность представляет собой геометрическую сумму двух слагаемых величин $R = \sqrt{x^2 + y^2}$, каждая из которых подчиняется закону Гаусса с параметрами:

$$L_{x\text{ ср}} = L_{y\text{ ср}} = L_{R\text{ ср}};$$

$$\sigma_x = \sigma_y = \sigma_0.$$

Этот закон распределения однопараметрический и уравнение его кривой распределения имеет вид (рис.2.24,б)

$$y = \frac{R^2}{\sigma_0^2} \ell^{-\frac{R^2}{2\sigma_0^2}}, \quad (2.89)$$

где σ_0 – среднее квадратическое отклонение значений координат x и y .

Из уравнения следует, что при $R = 0$ и $y = 0$ начало распределения эксцентриситета совпадает с началом координат.

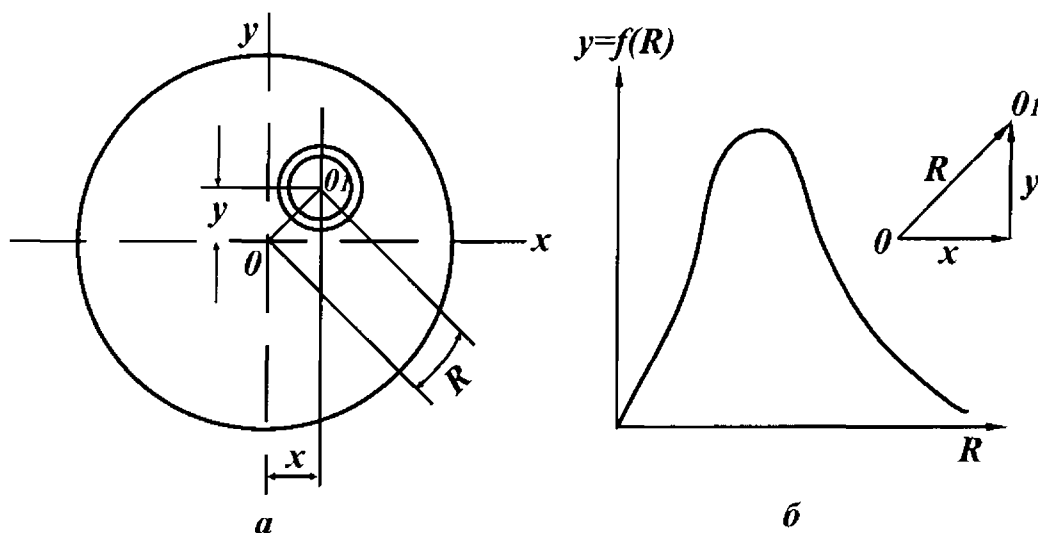


Рис.2.24. Эксцентричная втулка (а) и функция $y=f(R)$ распределения размеров по закону Релея [6]

Среднее квадратическое отклонение σ_R переменной случайной величины (эксцентриситета, разности и т. д.) и среднее квадратическое отклонение σ_0 значений координат x и y конца радиуса вектора R связаны между собой следующими соотношениями:

$$\sigma_0 = \frac{\sigma_R}{0,655}, \quad \sigma_R = 1,253\sigma_0.$$

Фактическое поле рассеяния значений переменной величины радиуса-вектора R (эксцентриситета, разностенности, непараллельности и др.) находятся из выражений: $\omega = 5,252\sigma_R$; $\omega = 3,44\sigma_0$.

2.10.4. Закон равной вероятности

Если рассеяние размеров зависит только от переменной систематической погрешности (например, износа режущего инструмента), то распределение действительных размеров партии обработанных заготовок подчиняется закону равной вероятности.

На (рис. 2.25, а) показан прямолинейный характер изменения размера обрабатываемой заготовки за период $T_2 - T_1$. Распределение размеров заготовок в интервале $2l = b - a$ подчиняется закону равной вероятности и выражается прямоугольником с основанием $2l$ и высо-

той $\frac{1}{2}l$ (рис. 2.25, б). Площадь прямоугольника равна единице, что означает 100-процентную вероятность появления размера заготовки в интервале от a до b .

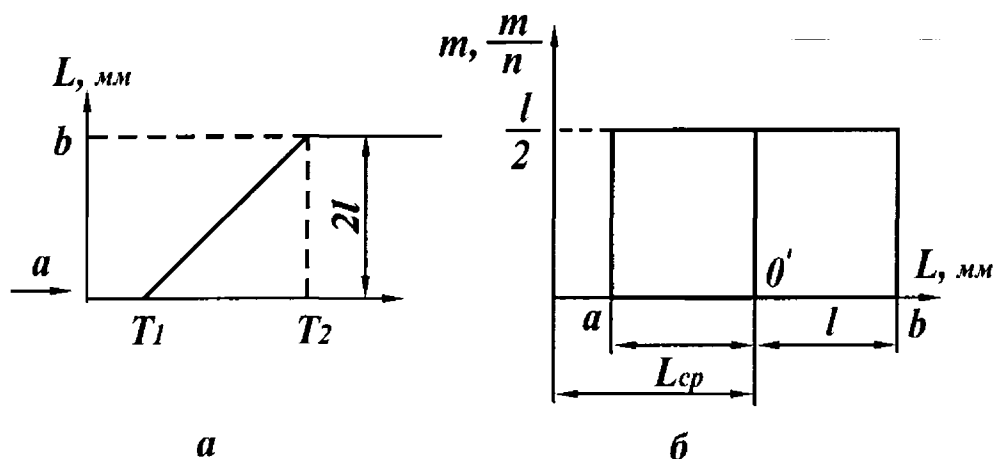


Рис. 2.25. Прямолинейный характер изменения размера (а), закон равной вероятности (б)

Среднее арифметическое значение

$$L_{cp} = \frac{a+b}{2}. \quad (2.90)$$

Среднее квадратичное $\sigma = \frac{b-a}{2\sqrt{3}} = \frac{l}{\sqrt{3}} \approx 0,577 \cdot l$.

Фактическое поле рассеяния

$$\omega = 2\sigma\sqrt{3} \approx 3,46\sigma. \quad (2.91)$$

2.10.5. Композиции законов распределения и суммирование погрешностей

При обработке деталей на станках, настроенных на размер, на точность полученных размеров заготовок оказывает влияние большое число одновременно действующих случайных погрешностей, подчиняющихся различным законам распределения и систематических погрешностей. В результате суммарного воздействия большого числа факторов распределение размеров обработанных деталей будет представлять композицию нескольких законов распределения.

Например, при обтачивании валиков, рассеяние размеров диаметров подчиняется закону нормального распределения с полем рассеяния 6σ . При повторной настройке станка на размер, при установке резца после переточки возникает систематическая погрешность, смещающая центр группирования размеров на величину $\Delta_{\text{сист.}}$ (рис. 2.26). В этом случае поле суммарного рассеяния размеров деталей будет определяться из выражения

$$\omega = 6\sigma + \Delta_{\text{сист.}} \quad (2.92)$$

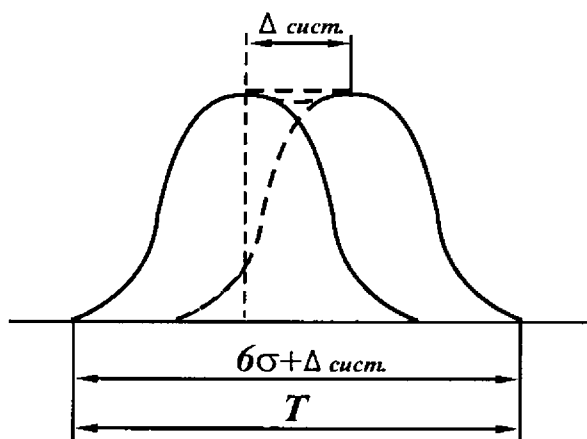


Рис.2.26. Изменение формы кривой рассеивания размеров под влиянием $\Delta_{\text{сист}}$

При определении суммарной погрешности следует иметь в виду, что систематические погрешности складываются алгебраически, т. е. с учетом их знака. В результате суммирование может вызвать не только увеличение, но и уменьшение общей погрешности обработки.

Например, удлинение резца в результате его нагрева может компенсировать его погрешность от износа режущей кромки.

Случайные погрешности суммируются как корень квадратный из суммы квадратов полей рассеяния случайных погрешностей

$$\omega = \sqrt{(k_1\omega_1)^2 + (k_2\omega_2)^2 + \dots + (k_n\omega_n)^2}, \quad (2.93)$$

где $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n$ – поля рассеяния случайных погрешностей; k_1, k_2, \dots, k_n – коэффициенты относительного рассеяния случайных величин, показывающие во сколько раз фактическое рассеяние ω_i отличается от рассеяния погрешностей по закону нормального распределения. Для закона нормального распределения случайных погрешностей $k = 1,0$; для закона Симпсона $k = 1,2$; для закона равной вероятности $k = 1,73$. Когда все случайные погрешности подчиняются одинаковому закону, например, закону нормального распределения

(закону Гаусса) ($k_1 = k_2 = k_3 = \dots = k_n = 1$) поле рассеяния суммарной погрешности определяется по формуле

$$\omega = k\sqrt{\omega_1^2 + \omega_2^2 + \dots + \omega_n^2}. \quad (2.94)$$

Систематическая погрешность со случайной погрешностью складывается арифметически.

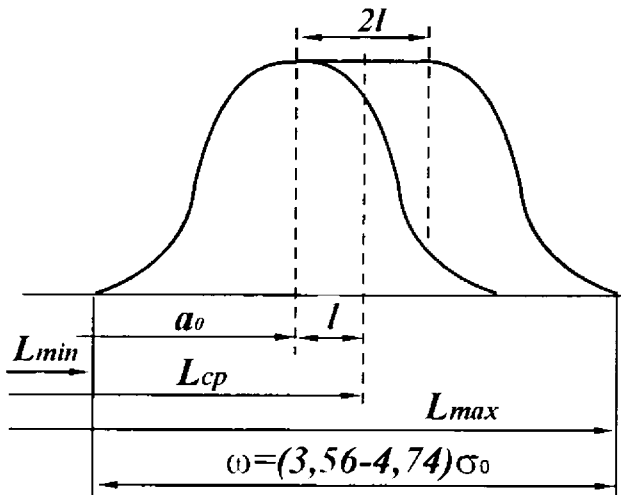


Рис. 2.27. Кривая функции $a(t)$

Композиция законов Гаусса и равной вероятности создает функцию распределения $a(\tau)$. Функция $a(\tau)$ формируется законом Гаусса с его параметром σ и законом равной вероятности с параметром $l = (b - a)/2$. Величина поля рассеяния композиционного закона зависит от интенсивности износа инструмента и продолжительности резания. Функция $a(\tau)$ характери-

зует равномерное смещение во времени вершины кривой Гаусса с параметром σ на величину $2l$ кривой распределения погрешности по закону равной вероятности.

На рис. 2.27 показана кривая функции $a(\tau)$

$$a(\tau) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \ell^{-\frac{(x-a_0-c_\tau)^2}{2\sigma^2}}, \quad (2.95)$$

где σ – среднее квадратическое отклонение закона нормального распределения; a_0 – среднее арифметическое значение размера в начальный момент времени τ ; c_τ – сумма неслучайных слагаемых, соответствующая моменту времени τ .

Форма кривой функции $a(\tau)$ зависит от параметра λ_a

$$\lambda_a = l/\sigma. \quad (2.96)$$

Линейную функцию $a(\tau)$ можно представить в виде

$$a(\tau) = a_0 + 2l\tau = a_0 + 2\lambda_a\sigma\tau.$$

Среднее арифметическое значение функции $a(\tau)$

$$L_{cp} = a_0 + l = a_0 + \lambda_a\sigma.$$

Среднее квадратическое отклонение σ_a функции $a(\tau)$

$$\sigma_a = \sqrt{\sigma^2 + \frac{l^2}{3}} = \sigma\sqrt{1 + \frac{1}{3}\lambda_a^2}. \quad (2.97)$$

Поле рассеяния размеров ω при функции распределения $a(\tau)$ зависит от параметра λ_a .

λ_a	3	6	10	24
ω	$4,74\sigma_a$	$4,4\sigma_a$	$3,76\sigma_a$	$3,56\sigma_a$

2.11. ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ ЗАКОНОВ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РАЗМЕРОВ ДЛЯ АНАЛИЗА ТОЧНОСТИ ОБРАБОТКИ

Изложенные законы распределения размеров используются в технологии машиностроения для установления надежности технологического процесса и обеспечения обработки заготовок без брака, определения количества заготовок, требующих дополнительную обработку, расчета настройки станков и сопоставления точности обработки заготовок при различном состоянии оборудования, инструментов, смазочно-охлаждающих жидкостей и т. д.

2.11.1. Установление надежности обработки заготовок без брака

Надежность обеспечения требуемой точности обработки заготовок характеризуется запасом точности данной операции, который определяется по формуле $\psi = T/\omega$,

где T – допуск на обработку заготовок; ω – фактическое поле рассеяния размеров заготовок.

Величины поля рассеяния ω при различных законах распределения размеров обрабатываемых заготовок приводятся ниже.

- Нормальное распределение (закон Гаусса)..... $\omega = 6\sigma$.
- Равнобедренный треугольник (закон Симпсона) $\omega = 2\sigma\sqrt{6} = 4,9\sigma$.
- Равная вероятность $\omega = 2\sigma\sqrt{3} = 3,46\sigma$.
- Эксцентриситет (закон Релея)..... $\omega = 3,44\sigma_0 = 5,25\sigma_R$.

Обработка заготовок может быть осуществлена без брака, когда запас точности $\psi > 1,0$ и при условии правильной настройки станка (поле кривой рассеяния совпадает с серединой поля допуска).

При $\psi \geq 1,2$ процесс обработки считается надежным. Для всех законов распределения размеров условием обработки заготовок без брака является условие $\omega < T$, показывающее, что поле фактического рассеяния размеров меньше допуска на изготовление. Для закона нормального распределения это выражение приобретает вид $6\sigma < T$.

При наличии систематической погрешности $\Delta_{\text{сист.}}$, вызывающей смещение поля рассеяния размеров, условие обработки заготовок без брака следующее

$$6\sigma + \Delta_{\text{сист.}} < T. \quad (2.98)$$

2.11.2. Определение количества вероятного процента бракованных деталей

Если поле рассеяния размеров больше поля допуска на изготовление деталей, то брак неизбежен. При определении вероятного процента бракованных деталей при симметричном расположении поля рассеивания размеров относительно поля допуска определяется половина площади, ограниченной кривой Гаусса и абсциссой x_0 (рис. 2.28,а), по формуле

$$\Phi(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_0^{x_0} \frac{(L_i - L_{cp})^2}{2\sigma^2} dL. \quad (2.99)$$

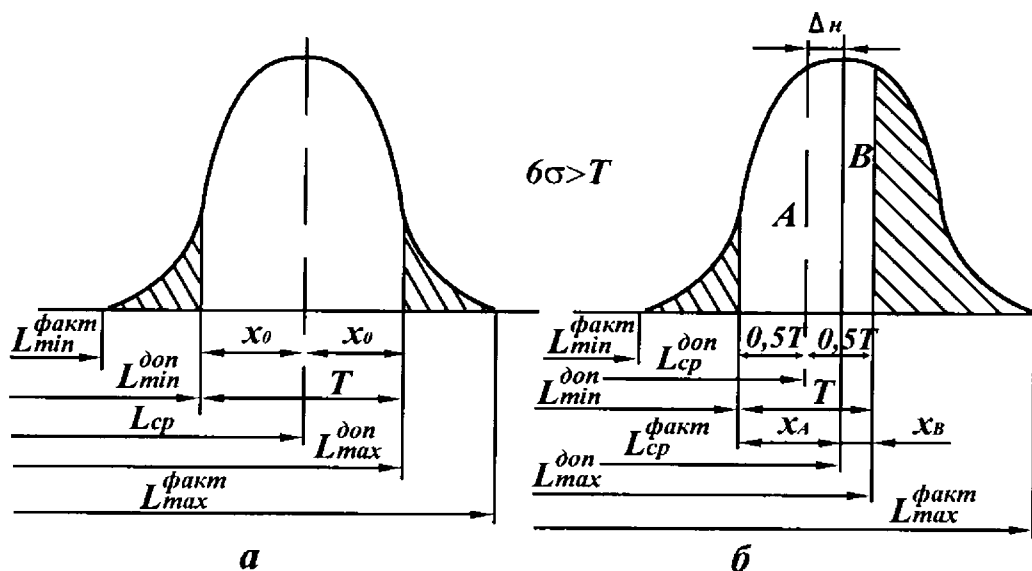


Рис. 2.28. Количество вероятного брака при симметричном (а) и асимметричном (б) расположении поля рассеяния размеров относительно поля допуска

Выражение (2.99) можно записать в нормированном виде в форме известной функции Лапласа:

$$\Phi(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^t e^{-\frac{t^2}{2}} dt. \quad (2.100)$$

В формуле (2.100) величина t представляет собой параметр распределения или коэффициент риска и определяется выражением

$$t = \frac{L - L_{cp}}{\sigma} = \frac{x_0}{\sigma}. \quad (2.101)$$

Решение функции Лапласа зависит не от конкретных значений x_0 и σ , а от отношения этих параметров.

Интервал изменения параметра $t = x_0/\sigma$ от 0 до 3 практически охватывает весь диапазон возможных колебаний функции Лапласа от 0 до 0,49865. По величине функции Лапласа судят о количестве годных деталей в процентах, например, $\Phi(t) = 0,49865$ соответствует 49,865% годных деталей из 50%. В табл. приложения 1 приведены результаты расчета функции Лапласа в интервале изменения аргумента $t = x_0/\sigma$ от 0 до 5.

Методику расчета количества бракованных деталей, основанную на использовании табулированной функции Лапласа (табл. приложения 1), рассмотрим на конкретном примере.

Пример: на токарно-револьверном станке, настроенном на размер, обрабатывалась партия валов $\varnothing 100_{-0,8}$ мм в количестве 500 штук. По результатам измеренных 75 обработанных деталей определена эмпирическая величина среднеквадратического отклонения $S = 0,02$ мм. Принимая, что центр группирования размеров совпадает с серединой поля допуска, определим количество бракованных деталей. Расчетная схема представлена на рис. 2.28, а.

Решение.

1. Принимаем, что распределение размеров подчиняется закону Гаусса. Систематические погрешности отсутствуют.

2. Определяем расчетное значение среднего квадратического отклонения σ по формуле $\sigma = pS$. Величина поправочного коэффициента p определяется из табл. (2.7).

Т а б л и ц а 2.7

n шт	$\Delta S \%$	p	n ,шт	$\Delta S \%$	p
25	42,4	1,4	200	15,0	1,15
50	30,0	1,3	300	12,2	1,12
75	25,0	1,25	400	10,6	1,11
100	21,2	1,2	500	10,0	1,10

$$\sigma = 1,25 \cdot 0,02 = 0,025 \text{ мм.}$$

3. Поле фактического рассеяния размеров $\omega = 6\sigma = 6 \cdot 0,025 = 0,15$ мм превосходит поле допуска $T = 0,08$ мм. Следовательно, условие работы без брака $\omega < T$ не выполняется и появление брака неизбежно.

4. Согласно расчету

$$x_0 = \frac{T}{2} = \frac{0,08}{2} = 0,04 \text{ мм,}$$

$$t = \frac{x_0}{\sigma} = \frac{0,04}{0,025} = 1,6.$$

Полученному аргументу соответствует функция $\Phi(t) = 0,4452$ (см. табл. приложение 1). Следовательно, количество готовых заготовок составляет 44,52%. Для всей партии от 500 штук количество годных деталей составит 89,04%, или 445 штук, а число бракованных деталей будет равно 55 штук, что составляет 10,96% от 100%.

Пример. На револьверном станке обрабатывается партия деталей $\varnothing 50_{-0,1}$ мм, состоящая из 500 штук. Расчетное значение среднеквадратического отклонения равно $\sigma = 0,025$ мм, $6\sigma > T$. Брак неизбежен.

Требуется определить количество годных и бракованных деталей, если центр группирования размеров смещен от середины поля допуска на величину $\Delta_H = 0,02$ мм.

Решение: 1. По площади A (рис. 2.28, б) определяются значения x_a и t_A :

$$x_a = \frac{T}{2} + \Delta_H = 0,05 + 0,02 = 0,07,$$

$$t_A = \frac{x_a}{\sigma} = \frac{0,07}{0,025} = 2,8.$$

Из табл. (приложения 1) определяем функцию Лапласа $\Phi(t_A) = 0,4974$. Количество годных деталей 49,74% от 50%.

2. Определяются значения x_b и t_B :

$$x_b = \frac{T}{2} - \Delta_H = 0,05 - 0,02 = 0,03,$$

$$t_B = \frac{x_b}{\sigma} = \frac{0,03}{0,025} = 1,2.$$

$\Phi(t_B) = 0,3849$, т. е. 38,49% годных заготовок.

Общее количество годных заготовок: $49,74 + 38,49 = 88,23$ % или 441 шт.

Общее количество бракованных деталей: $0,26 + 11,51 = 11,77$ %, что составляет 59 шт.

2.11.3. Определение количества заготовок, требующих дополнительной обработки

В ряде случаев, при выполнении срочного задания, обработку производят на высокопроизводительных автоматах, которые не всегда обеспечивают условие работы без брака $6\sigma \leq T$. Тогда при настройке станков заведомо смещают вершину кривой распределения по отношению середины поля допуска с таким расчетом, чтобы весь брак заготовок можно было исправить путем дополнительной обработки заготовок.

Например, обрабатываемые валы должны иметь размер диаметров больше предельно допустимых, а диаметры отверстий должны быть меньше номинального значения. При этих условиях после дополнительной операции шлифования детали могут стать годными.

Количество заготовок, требующих дополнительной обработки (рис. 2.29, а, б), заштрихованные зоны аналогично предыдущему соответствуют значениям X_A и X_B

$$X_A = X_B = T - 3\sigma - \Delta_H, \quad (2.102)$$

где Δ_H – допуск на настройку станка.

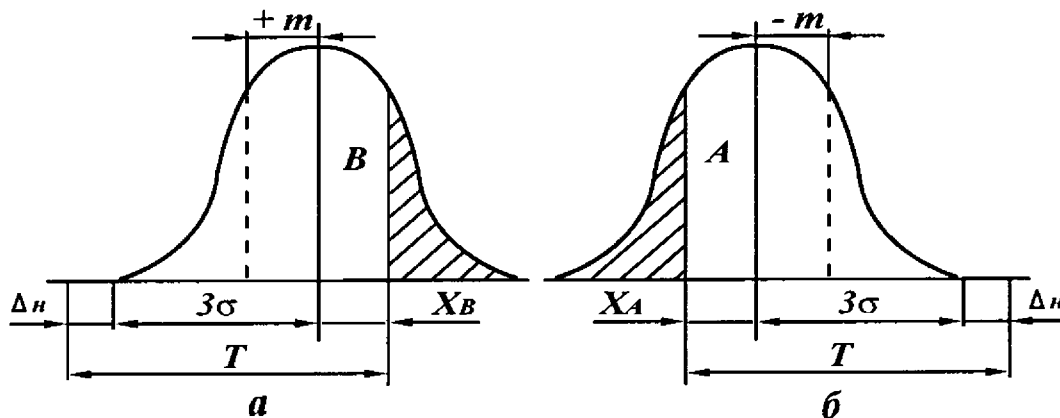


Рис. 2.29. Настройка станка для обработки вала (а) и отверстия (б) с исправимым браком

По формуле (2.101) находят аргумент функции Лапласа t и по таблице приложения функцию $\Phi(t_A)$ и $\Phi(t_B)$. Количество заготовок $Q_{\text{дод}}$, требующих доработки, определяется по формуле

$$Q_{\text{дод}} = [0,5 - \Phi(t)] \cdot 100. \quad (2.103)$$

Пример. Определить количество заготовок, требующих дополнительной обработки при $T = 0,1$ мм. $\sigma = 0,025$ мм; $\Delta_H = 0,02$ мм (рис. 2.29, а).

Решение: по формуле (2.102) $X_B = 0,1 - 3 \cdot 0,025 - 0,02 = 0,005$.

В соответствие с формулой (2.101) $t_B = 0,005/0,025 = 0,2$.

Следовательно $\Phi(t) = 0,0793$ (см прилож. 1). Количество валов, требующих дополнительную обработку, определяется по формуле (2.103)

$$Q_{\text{дод}} = (0,5 - 0,0793) \cdot 100 = 42,07\%.$$

2.11.4. Статистическое регулирование технологического процесса

Под статистическим регулированием понимается корректировка параметров процесса в ходе производства с помощью выборочного контроля изготавливаемой продукции для обеспечения требуемого качества и предупреждения брака.

Для статистического регулирования процесса применяют метод средних арифметических значений и размахов. Из потока продукции через определенный промежуток времени периодически отбирают выборку объемом 3 – 10 деталей. Чаще всего объем выборки принимают в 5 единиц. Период времени между двумя выборками устанавливается опытным путем. Он зависит от стабильности процесса и обычно составляет 1–2 часа. Размеры деталей выборки измеряют, определяют среднее арифметическое значение \bar{x} и размах варьирования R по формулам

$$\bar{x} = \sum_{i=1}^n x_i/n, \quad (2.104)$$

$$R = x_{\text{наиб}} - x_{\text{наим}}, \quad (2.105)$$

где x_i – результат замера контролируемого параметра; n – число замеров в выборке; $x_{\text{наиб}}$ и $x_{\text{наим}}$ – наибольшее и наименьшее значение размера деталей.

Полученные результаты замеров и расчетов наносят на контрольную карту (рис. 2.30).

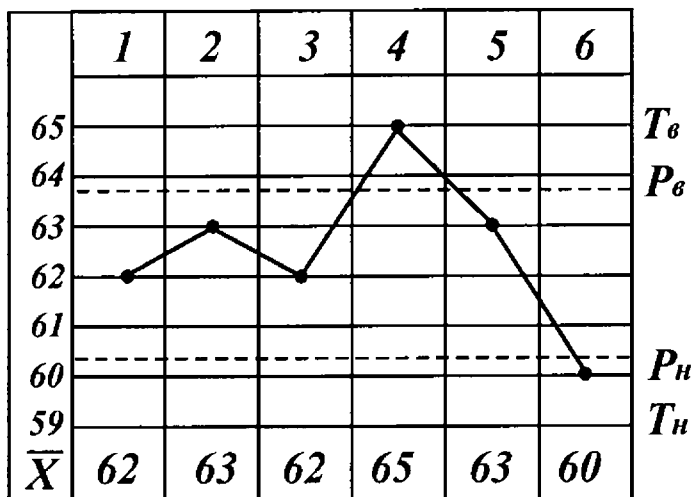


Рис. 2.30. Контрольная карта

Здесь T_v и T_n – внешние границы поля допуска диаметра шейки под шлицы $\Phi 38,65_{-0,06}$, а P_v и P_n – две внутренние границы, ограничивающие поле предупреждения.

При удовлетворительном протекании процесса обработки средние значения \bar{x} выборок не должны выходить за границы регулирования P_v и P_n . Предупредительные границы регулирования сигнализируют о возможности возникновения брака.

Границы P_v и P_n определяются по формулам

Границы P_v и P_n определяются по формулам

$$P_v = \bar{x} + u_p \frac{\sigma}{\sqrt{n}},$$

$$P_n = \bar{x} - u_p \frac{\sigma}{\sqrt{n}}.$$

Параметр u_p зависит от величины доверительной вероятности (табл. 2.8).

Т а б л и ц а 2.8

Доверительная вероятность	0,8	0,9	0,95	0,99	0,999
u_p	0,842	1,282	1,645	2,326	3,00

Из рис.2.30 видно, что выборки 4 и 6 сигнализируют о необходимости подналадки станка. После полученного сигнала продукция, изготовленная между двумя выборками, подлежит 100 процентному контролю.

2.12. МЕТОДЫ НАСТРОЙКИ СТАНКОВ И ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТОЧНОСТИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

Для осуществления технологической операции необходимо произвести настройку станка, т. е. произвести подготовку металлорежущего оборудования и технологической оснастки для обеспечения при обработке требуемой точности.

В условиях единичного и мелкосерийного производства требуемая точность достигается методом пробных проходов и промеров.

В крупносерийном и массовом производствах требуемая точность достигается методами автоматического получения размеров на станках, настроенных на размер.

Метод пробных проходов и промеров. Сущность метода заключается в том, что к обрабатываемой поверхности заготовки, установленной на станке, подводят режущий инструмент и на коротком участке заготовки снимают пробную стружку. После этого станок останавливают, делают пробный замер обработанного участка, определяют величину его отклонения от чертежного и вносят поправку в положение инструмента, которую отсчитывают по делениям лимба станка. Затем вновь производят пробную обработку нового участка заготовки с последующим промером полученного размера и при необходимости вносят новую поправку в положение инструмента.

Таким образом, путем пробных ходов и промеров устанавливают правильное положение инструмента относительно заготовки, при котором обеспечивается требуемый размер. При обработке следующей заготовки всю процедуру установки инструмента пробными ходами и промерами повторяют.

Метод пробных ходов и промеров имеет следующие достоинства: на неточном оборудовании можно получить высокую точность обработки; при обработке партии мелких заготовок исключается влияние износа режущего инструмента на точность; отпадает необходимость изготовления сложных дорогостоящих приспособлений типа кондукторов, поворотных и делительных приспособлений, так как положение центров отверстий предопределяется разметкой.

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

– при настройке пробными ходами рабочий не может внести в размер поправку менее толщины срезаемой стружки;

- низкая производительность обработки из-за больших затрат времени на пробные ходы, промеры и разметку;
- требуется высокая квалификация рабочего с повышенной оплатой труда.

При настройке станков на размер требуется обеспечить точность взаимного расположения режущих инструментов, приспособления, кулачков, упоров, копиров и других устройств, которые оказывают влияние на траекторию перемещения режущей кромки инструмента относительно обрабатываемой детали в процессе обработки.

На машиностроительных заводах применяются следующие методы настройки станков: статическая настройка, настройка с помощью рабочего калибра и настройка по пробным заготовкам.

Статическая настройка. Статическая настройка заключается в установлении режущих инструментов по эталону. Инструмент подводится до соприкосновения с поверхностью эталонной детали или калибра и закрепляется в этом положении. Для компенсации погрешностей, возникающих в результате податливости упругой системы, температурных деформаций и других факторов, эталонную деталь или калибр изготавливают с отступлениями от чертежа на величину некоторой поправки $\Delta_{\text{попр}}$.

Расчетный настроечный размер

$$D_{\text{н}}^{\text{рас}} = D_{\text{заг}} \pm \Delta_{\text{попр}}, \quad (2.106)$$

где $D_{\text{заг}}$ – размер диаметра детали, который должен быть получен после обработки $D_{\text{заг}} = (D_{\text{max}} + D_{\text{min}}) / 2$; (D_{max} и D_{min} – наибольший и наименьший предельные размеры диаметров заготовок по чертежу); $\Delta_{\text{попр}}$ – поправка, учитывающая деформацию в упругой технологической системе и шероховатость поверхности эталонной детали, по которой производится настройка станка,

$$\Delta_{\text{попр}} = \Delta_1 + \Delta_2 + \Delta_3, \quad (2.107)$$

где $\Delta_1, \Delta_2, \Delta_3$ – составляющие поправки, учитывающие соответственно действие сил резания, шероховатость поверхности эталона и величину зазора в подшипниках шпиндельного узла

$$\begin{aligned}\Delta_1 &= \frac{F_y}{k}, \\ \Delta_2 &= R_z\end{aligned}\quad (2.108)$$

где R_z – высота неровностей, мкм.

Для токарных станков обычной точности $\Delta_3 = 0,04$ мм, для токарных станков повышенной точности $\Delta_3 = 0,02$ мм.

Настройка станков по эталону не учитывает реальных условий обработки, поэтому она применяется в тех случаях, когда требуемая точность обрабатываемых деталей не выше 8–9 квалитетов. В тех случаях, когда точность обрабатываемых деталей ниже 8–7 квалитетов точности, статическая настройка дополняется динамической настройкой.

К числу достоинств статической настройки станков следует отнести возможность настройки инструментальных блоков по эталону вне станка.

Настройка с помощью рабочего калибра. Настройка станков по рабочему калибру осуществляется в следующей последовательности:

1. Станок настраивается по эталону.
2. На настроенном станке производится обработка нескольких деталей с последующим контролем по рабочему калибру полученных результатов.
3. Если размеры деталей находятся в пределах допуска рабочего калибра (проходной – непроходной), то настройка считается правильной и разрешается обработка всей партии заготовок.

Однако такой подход к оценке правильности настройки станков нельзя считать удовлетворительным, так как даже в наиболее благоприятном случае, когда допуск на обработку значительно больше поля рассеяния, нельзя гарантировать, что значительная часть заготовок партии не выйдет за пределы установленного допуска. Кривая рассеяния размеров может занимать внутри поля допуска различные положения, а по рабочему калибру нельзя определить, какому участку поля рассеяния она соответствует. Например, точки *A* и *B* (рис. 2.31) могут принадлежать кривым 1 и 2, расположение которых исключает вероятность появления брака, но эти же точки в равной степени могут принадлежать кривым 1*a* и 2*a*, которые в значительной части выходят за пределы допуска.

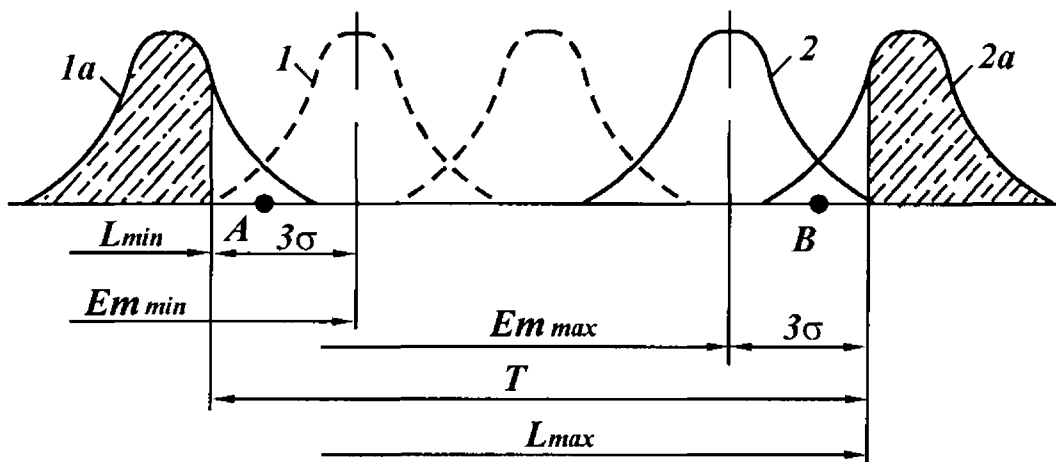


Рис. 2.31. Возможные положения кривых распределения размеров относительно поля допуска при $6\sigma < T$

При увеличении числа пробных деталей вероятность появления брака снижается, но опасность его появления не устраняется.

Для того, чтобы исключить опасность появления брака, необходимо выполнить условие $6\sigma < T$, а также с помощью настройки обеспечить совмещение центра группирования размеров с серединой поля допуска (рис. 2.31, штриховая кривая).

Методом настройки станка по рабочим калибрам обеспечить совмещение центра группирования размеров с серединой поля допуска нельзя. Эту задачу можно решить при использовании метода настройки станка по пробным заготовкам.

Настройка станка по пробным заготовкам. Сущность метода настройки станка по пробным заготовкам заключается в том, что установка режущего инструмента производится на размер L_H (рис. 2.32), а правильность настройки оценивается по некоторому количеству обработанных пробных заготовок m . Настройка считается правильной, если среднее арифметическое значение размеров пробных заготовок находится в пределах некоторого допуска на настройку T_H . На рис. 2.32 представлены две кривые распределения размеров, которые имеют среднеквадратичное отклонение σ и две кривые рассеяния групповых среднеарифметических величин, которые имеют среднеквадратичное отклонение $\sigma' = \frac{\sigma}{\sqrt{m}}$, где m – количество деталей в группе.

Кривые рассеяния размеров и кривые групповых среднеарифметических величин имеют одинаковое положение координат центров группирования размеров. На станке, настроенном по пробным заготовкам, брак будет исключен при условии, когда минимальный размер групповых средних пробных заготовок будет отвечать следующему условию

$$L_{\min}^{\text{гр.ср}} \geq L_{\min} + 3\sigma + 3\sigma / \sqrt{m}.$$

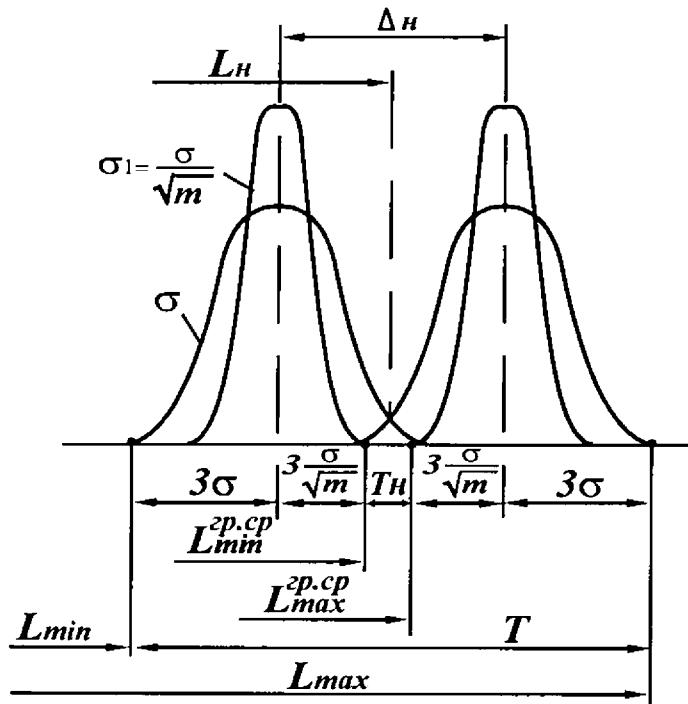


Рис. 2.32. Настройка станка, исключая появление брака

Аналогично сказанному

$$L_{\max}^{\text{гр.ср}} \leq L_{\max} - 3\sigma - 3\sigma / \sqrt{m}.$$

Разность предельных значений групповых средних размеров определяет величину допуска на настройку, т. е. $T_H = L_{\max}^{\text{гр.ср}} - L_{\min}^{\text{гр.ср}}$. Из расчетной схемы (рис. 2.32) допуск на настройку T_H выражается формулой

$$T_H = T - 6\sigma \cdot (1 + 1/\sqrt{m}). \quad (2.109)$$

Допуск на настройку, как видно из (2.109), зависит от общего допуска на изготовление партии заготовок T и от количества пробных заготовок m . С увеличением числа пробных заготовок m расширяется допуск на настройку T_H . Настроечный размер L_H определяется по формуле

$$L_H = \frac{L_{\min} + L_{\max}}{2} \pm 0,5T_H. \quad (2.110)$$

Настройка станка осуществляется в следующей последовательности:

1. Станок настраивается по эталону.

2. Производится обработка пробных деталей в количестве m штук. Величина пробных деталей колеблется от 4 до 8 деталей.

3. Определяется среднеарифметическое значение размеров обработанных деталей.

4. Если среднеарифметическая величина размера $L_H = \frac{\sum L_i}{m}$ находится в пределах допуска на настройку T_H , то настройка считается правильной. При такой настройке центры группирования размеров обрабатываемых деталей и размеров групповых среднеарифметических величин находятся в области середины поля допуска на изготовление детали. Если среднеарифметическая величина размеров m выходит за пределы допуска на настройку T_H , необходимо осуществить дополнительную подналадку.

Настройка станков обеспечивает автоматическое получение размеров на настроенных станках. Ответственность за обеспечение требуемой точности обработки несет не рабочий оператор, а настройщик, который производит настройку станка, а также технолог, назначающий технологические базы и размеры заготовки.

К достоинствам методов настройки станков на размер относят: повышение точности обработки и снижение брака; увеличение производительности обработки за счет устранения потерь времени на предварительную разметку заготовки и осуществление пробных ходов и промеров; рациональное использование рабочих высокой и низкой квалификации: высококвалифицированные рабочие выполняют настройку станков, а ученики и малоквалифицированные рабочие операторы выполняют работу на настроенных станках.

Погрешности настройки станков. Погрешность настройки станка Δ_H является случайной величиной, зависящей от воздействия погрешностей регулирования $\omega_{\text{рег}}$, положения режущего инструмента относительно узлов станка и от погрешностей измерения $\omega_{\text{изм}}$ пробных заготовок. Суммарная погрешность настройки определяется выражением

$$\Delta_H = \omega_H = 1,2 \sqrt{\omega_{\text{рег}}^2 + \omega_{\text{изм}}^2} . \quad (2.111)$$

При настройке станка по пробным заготовкам с помощью универсального измерительного инструмента на погрешность настройки оказывает дополнительное влияние величина смещения центра группирования групповых средних, которая определяется по формуле [23]

$$\omega_{\text{смещ}} = \omega_{\text{м}} / \sqrt{m},$$

где $\omega_{\text{м}}$ – величина поля рассеяния размеров, которая составляет: для револьверных станков – 0,016 – 0,039 мм; токарных – 0,013 – 0,036 мм; круглошлифовальных – 0,004 – 0,017 мм.

Из исследований А. А. Маталина известно, что поле рассеяния, связанное с закреплением детали $\omega_{\text{з}}$, составляет: в тисках – 0,05–0,2 мм; прихватами – 0,01 – 0,2 мм; в патроне – 0,04 – 0,1 мм. Погрешность приспособления $\omega_{\text{пр}} = 0,005 \div 0,02$ мм; погрешность регулирования $\omega_{\text{рег}}$ при установке по лимбу или по индикатору – 0,01–0,06 мм; по жесткому упору – 0,04 – 0,10 мм.

Для уменьшения погрешности настройки необходимо сокращать погрешность измерения $\omega_{\text{изм}}$ пробных заготовок за счет использования более точного измерительного инструмента и погрешность регулирования $\omega_{\text{рег}}$ за счет использования более точных установочных устройств и совершенствования конструкции механизмов перемещения и отсчетных лимбов станка.

Точность обработки в значительной мере зависит от податливости упругой системы, температурных деформаций, погрешностей кинематики, настройки станков и точной ориентации детали на приспособлении. Взаимная ориентация детали в приспособлении называется базированием.

Г Л А В А 3

БАЗИРОВАНИЕ И БАЗЫ В МАШИНОСТРОЕНИИ

3.1. БАЗИРОВАНИЕ И ЗАКРЕПЛЕНИЕ ЗАГОТОВОК

Задачи взаимной ориентации деталей и сборочных единиц в машинах и при их сборках решаются с помощью базирования.

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

Для выполнения технологической операции требуется не только осуществлять базирование заготовки относительно приспособления, но также обеспечить ее неподвижность, гарантирующую сохранение неизменной ориентацию заготовки относительно баз в процессе обработки. Следовательно, при установке заготовки в приспособлении решаются две задачи: ориентация, осуществляемая базированием, и неподвижность, достигаемая закреплением заготовок.

Несмотря на различие задач, они решаются практически одинаковым путем: наложением определенных ограничений (связей). Чтобы исключить возможность перемещения твердого тела в пространстве, необходимо лишить его шести степеней свободы: трех поступательных движений вдоль осей координат и трех вращательных движений вокруг этих осей. Это достигается наложением связей, ограничивающих движение заготовок относительно базирующих поверхностей приспособления. В соответствии с характером ограничений различают позиционные (геометрические) и кинематические связи, ограничивающие перемещения и скорости движения соответственно. Чтобы сориентировать призматическое тело (рис. 3.1) в пространстве, необходимо его соединить с плоскостью прямоугольной системы координат XOY недеформируемыми стержнями (связями) a_1, a_2, a_3 , сохраняя при этом возможность перемещения призматического тела вдоль осей OX и OY . В результате призматическое тело лишается

трех степеней свободы: движения вдоль оси OZ и вращательного движения вокруг осей OX и OY . Для лишения тела возможности перемещаться вдоль оси OX и поворота вокруг оси OZ необходимо соединить боковую поверхность двумя связями с плоскостью YOZ . Для полной ориентации тела необходимо лишить его шестой степени свободы, т. е. возможности перемещения вдоль оси OY . Для этого поверхность необходимо соединить одной связью с плоскостью XOZ .

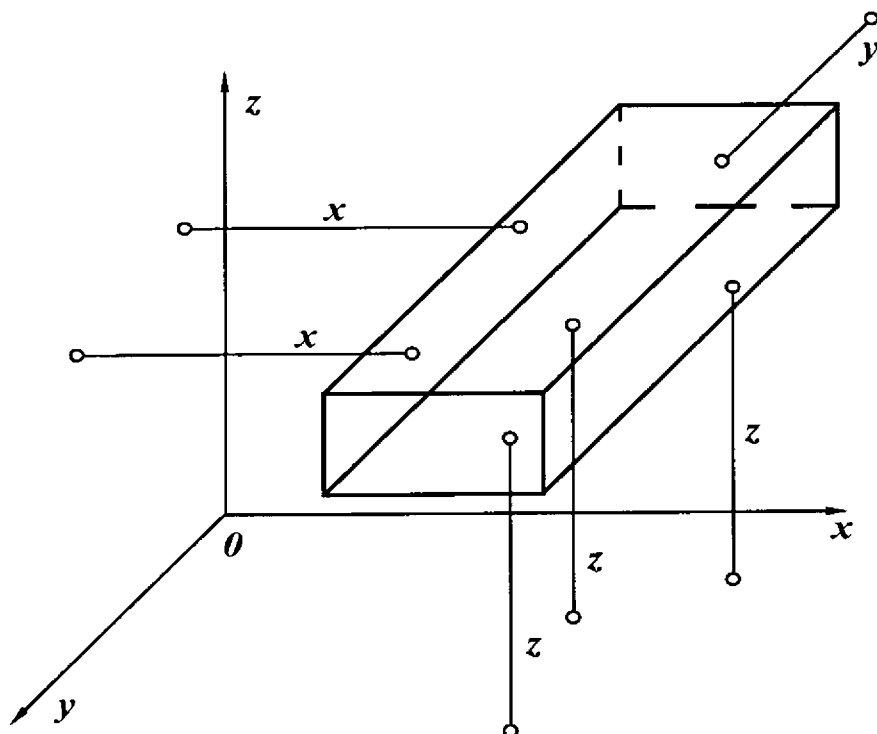


Рис. 3.1. Ориентировка призматического тела в пространстве

Поверхности заготовок, используемые при базировании, называют базами. В зависимости от числа степеней свободы, отнимаемых у призматической заготовки, различают установочную базу, находящуюся в контакте с тремя опорными точками (связями), направляющую базу, находящуюся в контакте с двумя опорными точками (связями), и упорную базу, имеющую контакт с одной опорной точкой (рис. 3.1). В качестве установочной базы принимают поверхность с наибольшими размерами, в качестве направляющей – самую длинную поверхность.

Для ориентации цилиндрического вала ($l > d$) в пространстве необходимо цилиндрическую поверхность соединить двумя двухсто-

ронными связями – координатами Z с плоскостью XOY и двумя связями – координатами X с плоскостью YOZ (рис. 3.2).

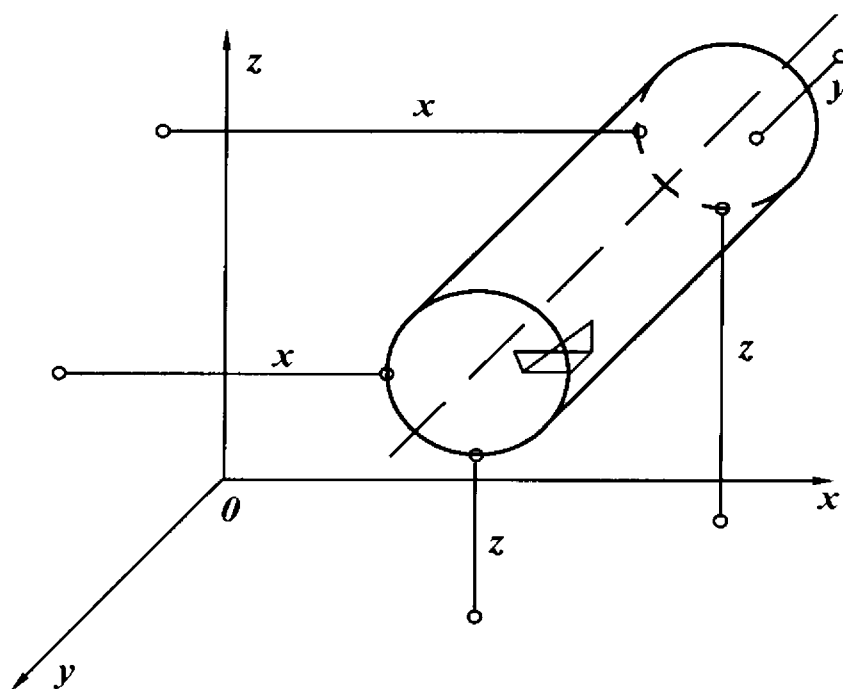


Рис. 3.2. Ориентирование цилиндрического тела в пространстве

База, имеющая четыре опорные точки, называется двойной направляющей базой. Пятая опорная точка располагается на торце вала и называется опорной базой. Шпоночная канавка является шестой опорной точкой.

При обработке заготовок на станках и их установке в приспособлении во многих случаях нет необходимости в ориентации заготовки с использованием всего комплекта баз, контактирующих с шестью опорными точками приспособления. Например, при обработке плоскости призматической заготовки (рис. 3.3, *a*) требуется обеспечить получение размера a . Здесь требуемая ориентировка осуществляется только одной установочной базой.

Если на заготовке требуется получить два размера (например, a и b) (рис. 3.3, *b*), то возникает необходимость ее ориентации с помощью установочной и направляющей баз. Если на заготовке требуется обеспечить получение трех размеров (например, a , b , c , рис. 3.3, *в*), то для ориентации заготовки необходимо использовать весь комплект из трех баз.

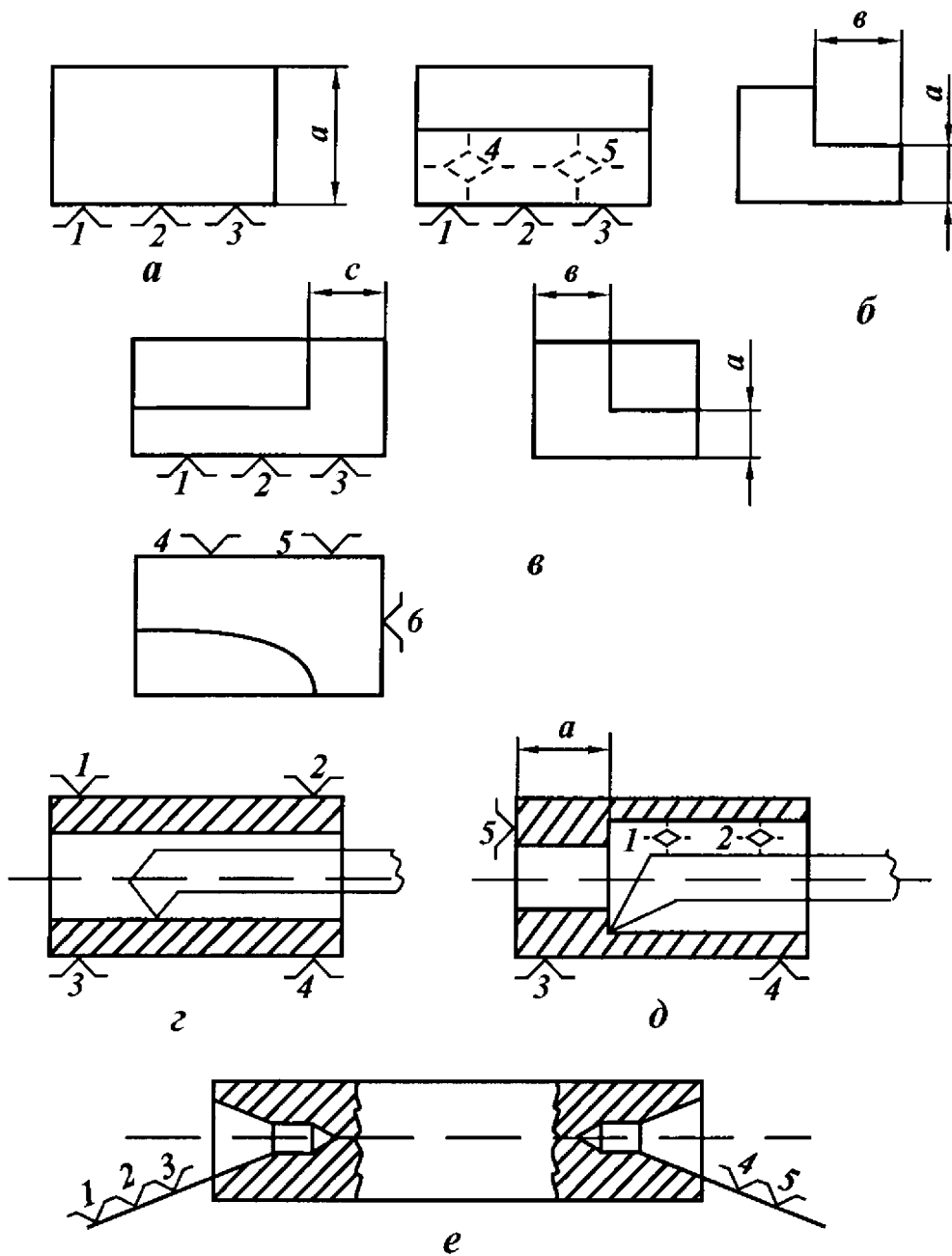


Рис. 3.3. Теоретические схемы базирования от одной (*а, г*), двух (*б, д, е*) и трех (*в*) баз

При сквозном сверлении или растачивании отверстия заготовки, закрепленной в патрон станка, используется только одна двойная направляющая база (рис.3.3,*г*).

При растачивании ступенчатого отверстия, когда требуется обеспечить линейный размер *а*, необходимо использование двух баз: двойной направляющей и опорной (рис.3.3,*д*).

При установке вала в центрах станка базирование осуществляется по двум центровым отверстиям.

Передний центр отнимает три степени свободы, а задний две (рис. 3.3, *e*). Шестая степень свободы предусматривает возможность вращения шпинделя вокруг собственной оси. Она необходима для осуществления обработки.

Следует отметить, что хомутик, предназначенный для передачи крутящегося момента обрабатываемой детали, не является шестой опорной точкой, так как он не участвует в базировании, т. е. не ориентирует положение заготовки.

Таким образом, в зависимости от решения технологической задачи при базировании заготовки на станке или приспособлении могут быть использованы одна, две или три базы, имеющие три, четыре, пять или шесть опорных точек. При проектировании технологических операций на операционном эскизе изображается так называемая «теоретическая схема базирования». Теоретическая схема базирования представляет собой схему расположения на технологических базах опорных точек, символизирующих позиционные связи заготовки с системой координат. Теоретическая схема базирования служит определенной схемой-инструкцией конструктору на разработку приспособления.

Например, изображенная схема базирования втулки (рис. 3.4, *a*) предполагает обработку на жесткой цилиндрической оправке, а схема базирования – (рис. 3.4, *б*) на разжимной цанговой оправке или с применением гидропласмассы (безззорное центрирование).

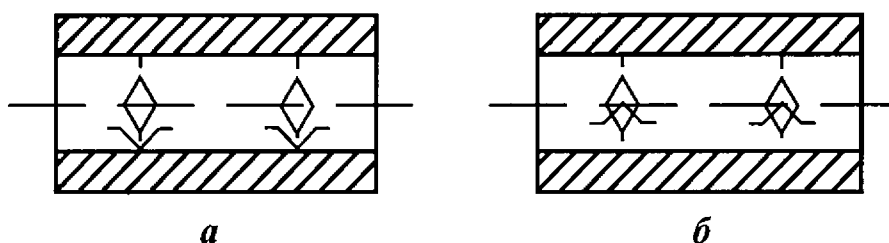


Рис. 3.4. Теоретические схемы базирования втулки на жесткой (*a*) и разжимной (*б*) оправках

На операционных эскизах изображение нескольких одноименных опорных точек может быть заменено одним символом с указанием справа от него количества одноименных опор.

Комплект базовых поверхностей заготовки с опорными точками приспособления обеспечивается созданием необходимых зажимных устройств. Закрепление лишает заготовку всех шести степеней сво-

боды и основывается на использовании фрикционных связей, реализуемых в зажимных устройствах с разнообразными источниками приложения силы (механические, гидравлические, пневматические, магнитные, вакуумные и т. п.).

3.2. ВИДЫ БАЗ

Базой называется поверхность, линия или точка детали, по отношению к которой ориентируются другие детали или другие поверхности данной заготовки при проектировании, сборке или механической обработке. По назначению базы подразделяются на конструкторские, измерительные и технологические.

Конструкторской базой называется база, используемая для определения положения детали или сборочной единицы в изделии (ГОСТ 21495 – 76). Конструкторские базы подразделяются на основные и вспомогательные. Основной называется конструкторская база, принадлежащая данной детали или сборочной единице, используемая для определения ее положения в изделии. Вспомогательной называется конструкторская база, которая используется для присоединения к ней других деталей или узлов (ГОСТ 21495 – 76).

Например, на рис. 3.5 представлен ступенчатый вал, имеющий две шейки под подшипники (А) и шейку для установки зубчатого колеса (Б). Основной конструкторской базой здесь являются две шейки под подшипники (А), ибо они определяют положение вала в корпусе. Вспомогательной конструкторской базой является шейка под зубчатое колесо. Она определяет положение на валу зубчатого колеса.

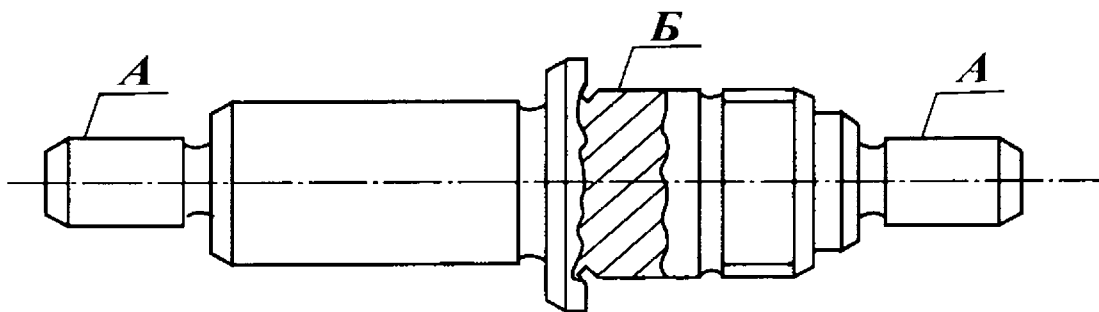


Рис. 3.5. Конструкторские базы: основная (А) и вспомогательная (Б)

Измерительной базой называется поверхность, линия или точка, от которой производится отсчет выполняемых размеров при обработке или измерении, а также при проверке взаимного расположения поверхностей деталей (параллельность, соосность, перпендикулярность и др.)

Технологическая база – это база, используемая для определения положения заготовки в процессе изготовления или ремонта.

Базирование применяется на всех стадиях создания изделий: при конструировании, изготовлении, измерении и сборке машины. Схематично классификацию баз можно представить в виде следующей схемы (рис. 3.6).



Рис. 3.6. Классификация баз

Если конфигурация заготовок не дает возможности выбрать технологическую базу, позволяющую удобно, устойчиво и надежно ориентировать и закреплять заготовку в приспособлении, то прибегают к созданию искусственных технологических баз. К категории искусственных технологических баз относятся такие технологические базы, которые с целью повышения точности базирования обрабатываемой

заготовки в приспособлении предварительно обрабатываются с более высокой точностью, чем это требуется для готового изделия по чертежу.

Типичным представителем искусственных технологических баз являются центровые отверстия, используемые для установки валов на станке. Если центровые отверстия являются конструктивно необходимыми для работы элементов узла, то в этом случае они не являются искусственными базами. Если по условиям эксплуатации вала центровые отверстия недопустимы, то после обработки вала их срезают.

При обработке деталей сложнофасонной формы, например, газотурбинных лопаток, в качестве технологических баз используют специально созданные приливы, которые после механической обработки пера лопатки отрезаются. Наличие шести опорных точек на приспособлении позволяет сориентировать заготовку в пространстве. Однако при установке деталей малой жесткости с большими размерами базирование по шести точкам не обеспечивает требуемую точность обработки. В этих случаях технолог использует дополнительные опорные поверхности. Причем, дополнительные опорные поверхности могут быть естественными, т. е. полученными в процессе обработки в соответствии с требованиями чертежа, и искусственными, созданными специально для ее установки и закрепления.

В качестве примера можно привести обработку на токарном станке длинных валов. Для предотвращения прогиба вала применяют специальные люнеты для поддержки.

По ходу технологического процесса технологические базы разделяются на черновые (предварительные), промежуточные и окончательные. Черновые базы используют на первых операциях обработки. Они служат для создания промежуточных технологических баз, а часто и окончательных. При обработке деталей на автоматических линиях в приспособлениях – спутниках, на станках ЧПУ, многооперационных станках вся обработка может быть завершена при одной установке заготовки.

Черновая технологическая база может быть использована только для одной установки. Повторное ее использование нарушает взаимное расположение обрабатываемых поверхностей. В качестве черновой базы рекомендуется выбирать черные поверхности, т. е. поверхности, которые после завершения обработки остаются не обработанными.

3.3. ПРИНЦИП СОВМЕЩЕНИЯ БАЗ

3.3.1. Общие понятия о совмещении баз

Точность обработки поверхности детали разделяется на точность, которая обеспечивается методом обработки, и точность расположения обрабатываемой поверхности относительно других поверхностей. Понятие о точности положения поверхности существует только при условии наличия элемента, относительно которого рассматривается это положение. Элементы, играющие такую роль, называются базами. Соответственно этому точность расположения обрабатываемой поверхности зависит от точности размера, связывающего ее с базой.

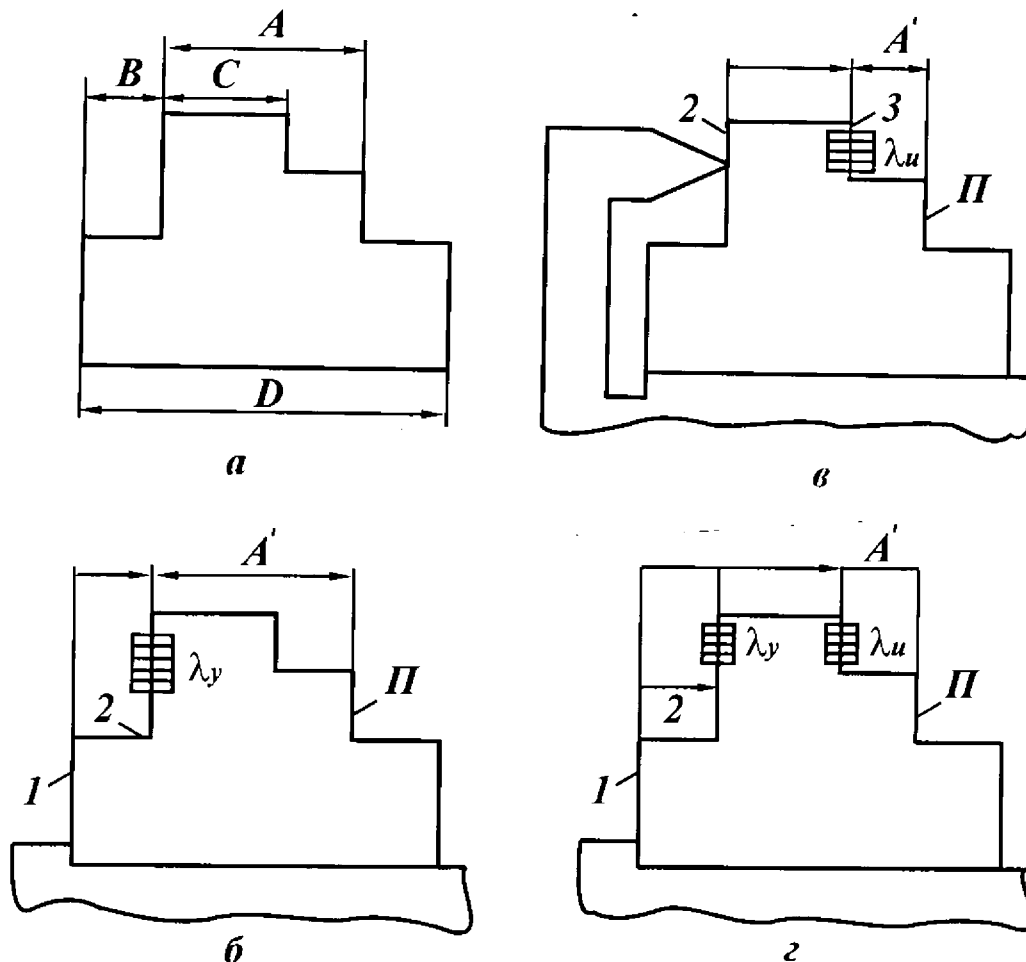


Рис. 3.7. Различные схемы базирования детали

Принцип совмещения баз заключается в использовании исходной поверхности детали в качестве конструкторской, измерительной и установочной базы. Возможность совмещения баз зависит прежде

всего от взаимной координации размеров поверхностей на чертеже детали.

Для технолога конструкторская база является заданной, так как он выполняет требования чертежа. Для него принцип совмещения баз состоит в том, чтобы при разработке технологического процесса предусмотреть использование в качестве технологических баз (установочной и измерительной) конструкторскую базу. Из сопоставления чертежа детали и различных схем базирования (рис. 3.7) наглядно видно, что выбор технологических баз предопределяет возникновение погрешностей. Например, на чертеже детали все размеры имеют один и тот же допуск $T = 0,1$ мм ($TA = TB = TC = TD = 0,1$ мм) (рис. 3.7, а). Требуется обработать поверхность П, выполняя чертежный размер $A^{+0,1}$. Технологические эскизы обработки поверхности П при различных схемах базирования представлены на рис. 3.7, б, в, г.

Вариант обработки 1. Исходный технологический размер A' совмещен с конструкторским размером A (рис. 3.7, б). Установочная база (плоскость 1) не совпадает с конструкторской базой 2. Несовмещение конструкторской и установочной баз вызывает появление погрешности λ_y (λ_y – погрешность от не совмещения конструкторской и установочной баз). При такой схеме базирования допуск на исходный технологический размер определяется из выражения

$$TA' = TA - \lambda_y.$$

Из технологического эскиза (рис. 3.7, б) видно, что исходный технологический размер A' , координирующий обрабатываемую поверхность П, поставлен от плавающей базы 2. Диапазон колебания плавающей базы равен допуску на размер B ($\lambda_y = TB = 0,1$ мм).

Следовательно, допуск на технологический размер TA' будет равен нулю

$$TA' = TA - TB = 0,1 - 0,1 = 0.$$

Чтобы иметь реальную возможность обработки поверхности П при данной схеме базирования надо произвести ужесточение допуска на размер B . Обеспечивая точность изготовления размера B в пределах $TB = 0,05$ мм, получим

$$TA' = TA - \lambda_y = 0,1 - 0,05 = 0,05 \text{ мм.}$$

Вариант обработки 2. На рис. 3.7, *в* показан технологический эскиз обработки поверхности П. Здесь в качестве установочной базы принята поверхность 2, а в качестве измерительной базы – поверхность 3. В данном варианте обработки установочная база совмещена с конструкторской, но нарушен принцип совмещения конструкторской и измерительной баз.

Исходный технологический размер A' поставлен от плавающей базы 3. Диапазон плавающей базы равен допуску на размер C

$$TA' = TA - \lambda_N = TA - TC = 0,1 - 0,1 = 0.$$

Если не ужесточить допуск на размер C , то производить обработку поверхности П при данной схеме базирования не представляется возможным. Принимая $TC = 0,05$, получим

$$TA' = TA - \lambda_N = 0,1 - 0,05 = 0,05.$$

Вариант обработки 3. На рис. 3.7, *г* показан технологический эскиз обработки поверхности П. Здесь в качестве установочной базы принята поверхность 1, а в качестве измерительной – поверхность 3.

В данном варианте обработки ни одна из технологических баз (установочная и измерительная) несовмещены с конструкторской базой. При такой схеме базирования допуск на исходный технологический размер определяется из выражения

$$TA' = TA - \lambda_y - \lambda_N.$$

Производя ужесточение допусков на размеры B и C , получим

$$TA' = TA - TB - TC = 0,1 - 0,03 - 0,03 = 0,04 \text{ мм.}$$

Вывод: нарушение принципа совмещения баз вызывает неизбежное появление погрешностей. Для устранения возникающих погрешностей требуется ужесточение допусков размеров детали, выполняемых на предыдущих операциях.

В практике не бывает причин, оправдывающих несовмещение всех баз. Несовмещение какой-либо одной из технологических баз с конструкторской надо расценивать как грубую технологическую ошибку, если отсутствуют какие-либо исключительные соображения.

3.3.2. Влияние принципа совмещения баз на последовательность обработки поверхностей

Обеспечение принципа совмещения баз на всех операциях технологического процесса требует строгой последовательности выполнения операций и согласованности с координацией размеров на чертеже деталей. Это вытекает из следующих соображений.

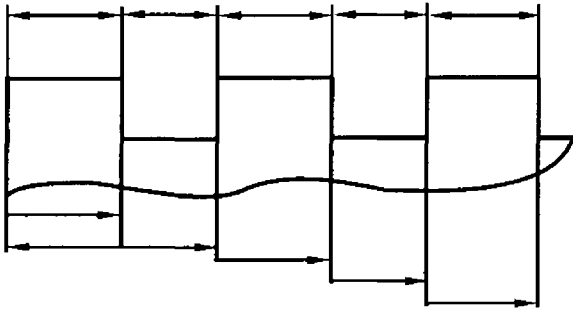


Рис. 3.8. Координация поверхностей на чертеже и необходимая последовательность обработки

необработанных. Следовательно, именно она должна служить измерительной и установочной базой на следующей операции.

Но, согласно положению 1, в этой следующей операции должна быть обработана не любая поверхность, а именно та, с которой обработанная поверхность непосредственно связана размером на чертеже (рис.3.8).

3. Третьей по счету может обрабатываться лишь та поверхность, которая связана размером с одной из двух уже обработанных. Если одна из поверхностей детали непосредственно связана размерами с несколькими другими поверхностями (например, А на рис.3.9), то в первую очередь должна быть обработана эта поверхность, а от нее должны обрабатываться все остальные поверхности.

1. Каждая из двух поверхностей, связанных на чертеже детали размером, является измерительной базой по отношению к другой. Следовательно, при обработке одной из них роль измерительной и установочной баз должна выполнять другая. (Принцип совмещения баз обеспечен).

2. Поверхность, уже обработанная на данном этапе, имеет точность большую, чем любая из

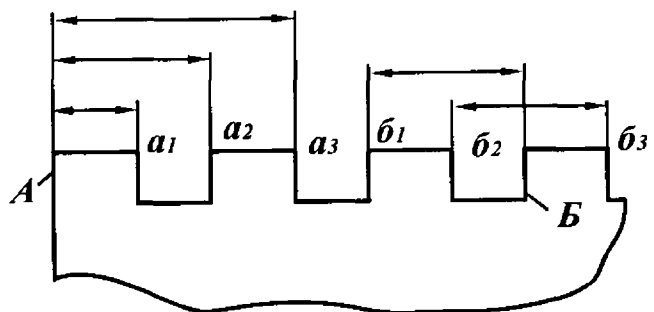


Рис. 3.9. Поверхность А должна быть обработана раньше, чем поверхности a_1 , a_2 , a_3 , а поверхность Б – раньше, чем b_1 , b_2 и b_3

На рис. 3.10 представлены два варианта одной и той же детали с различной координацией поверхностей. Ниже представлены операционные эскизы технологических процессов, обеспечивающих на всех операциях принцип совмещения баз. Простановка размеров на чертеже детали по варианту Б считается наиболее технологичной, так как все размеры сравнительно просто подвергаются измерению.

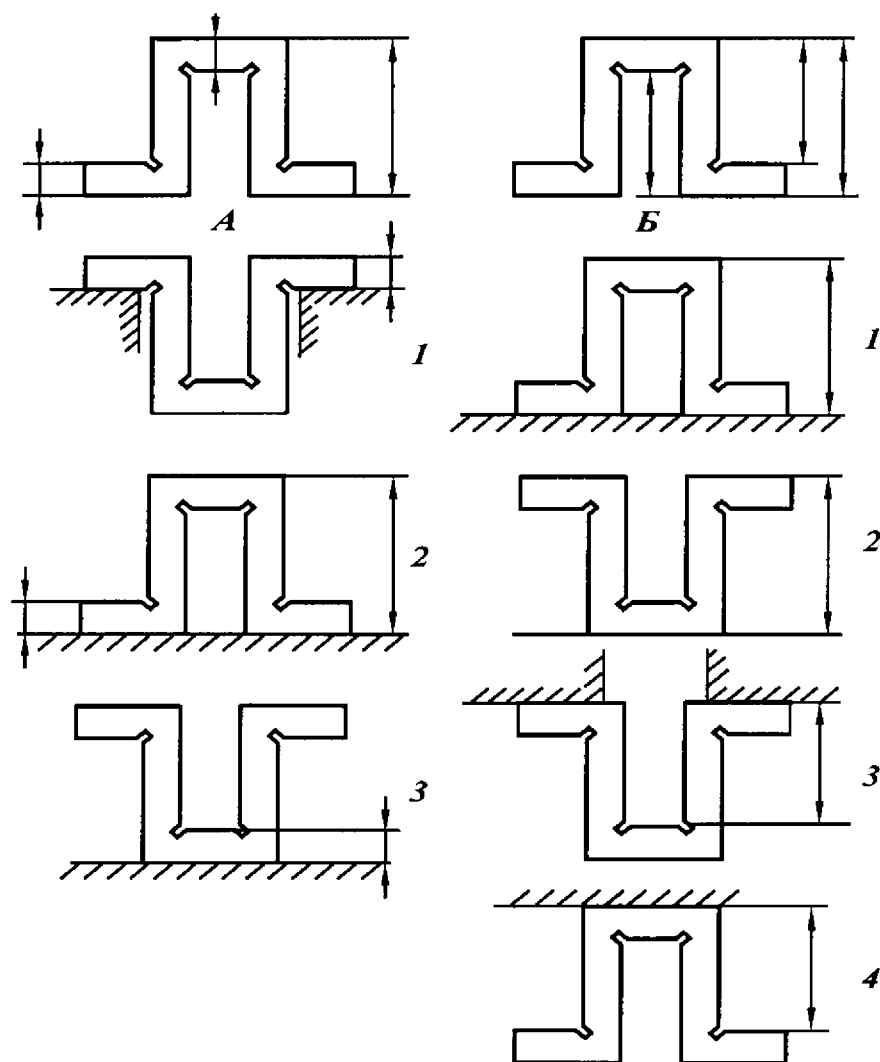


Рис. 3.10. Два варианта координации размеров детали и технологические процессы обработки

С позиции технологии изготовления, наоборот, наиболее технологичным считается вариант А. Он имеет меньшее количество операций и более простые конструкции приспособления для обработки.

На операциях 3 и 4 (вариант Б) возникают большие трудности с установкой и закреплением детали, которая находится в подвешенном состоянии. Возникают также трудности с проектированием кон-

струкции приспособления. Сила тяжести направлена в сторону, противоположную усилию зажима, что недопустимо при проектировании приспособлений. Указанные недостатки не позволяют реализовать на практике технологический процесс по варианту Б. В этом случае технолог должен отказаться от принципа совмещения баз.

Рассмотренный пример указывает на роль и значение способа координации размеров на чертеже. Следует заметить, что конструктор при проектировании размеров в первую очередь решает свои задачи, которые в ряде случаев не совпадают с задачами, решаемыми технологом. Учитывая различие требований, предъявляемых к конструкторским и технологическим базам, технолог при разработке технологического процесса в ряде случаев вынужден отказаться от принципа совмещения баз. К числу причин, которые вынуждают технолога отказаться от принципа совмещения баз, относятся:

1. Непригодность конструкторской базы для роли установочной базы.
2. Непригодность конструкторской базы для роли измерительной базы.

Один из примеров показан на рис. 3.11. Совмещение установочной базы с конструкторской будет при установке детали по схеме (б).

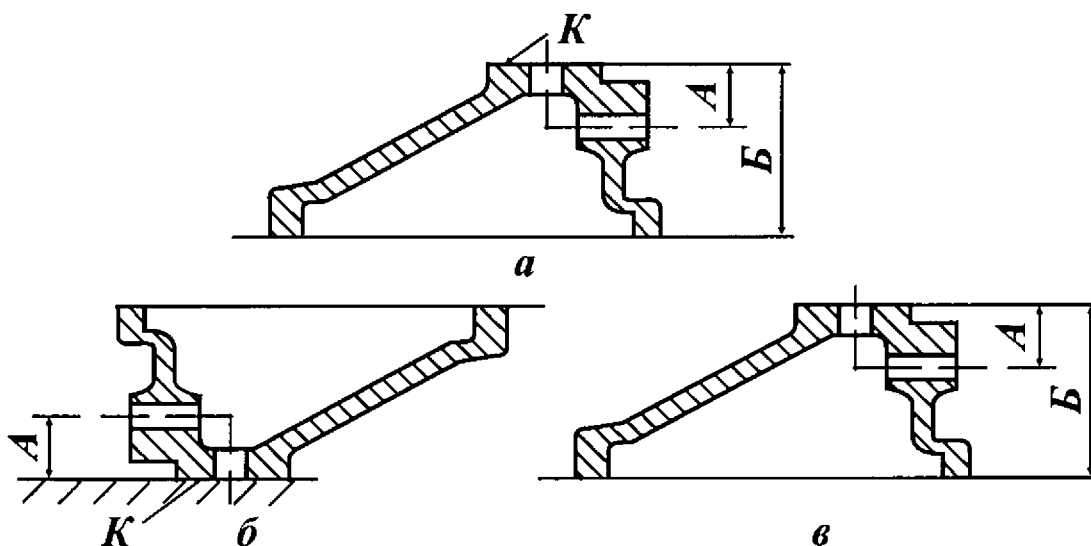


Рис. 3.11. Два варианта базирования при обработке отверстий

Однако, конструкторская база *K* мало пригодна для использования ее в качестве установочной базы (устойчивость детали получается плохой). Отказ от совмещения установочной базы с конструкторской

торской (схема *в*) позволяет упростить конструкцию приспособления и обеспечить устойчивость детали при обработке. Однако при этом возникает погрешность, которая требует ужесточения размера *Б*.

После отказа от принципа совмещения баз нужно использовать в качестве установочной базы ту поверхность, которая наиболее точно расположена относительно конструкторской базы и, выбрав ее, обеспечить принцип постоянства баз.

3.4. ПРИНЦИП ПОСТОЯНСТВА БАЗ

Принцип постоянства баз заключается в том, что обработку всех поверхностей детали выполняют от одной и той же (постоянной) установочной базы. Рассмотренное правило учитывает закономерность возникновения погрешностей в условиях несовмещения баз.

При обработке двух любых поверхностей от разных установочных баз возникает погрешность, равная допуску на размер, связывающий расстояние между установочными базами. К принципу постоянства установочной базы прибегают в том случае, когда обнаруживается невозможность совместить базы на многих операциях технологического процесса.

Конструктор при разработке рабочих чертежей решает задачи, связанные с обеспечением нормального функционирования узлов в изделии. Технолог при разработке технологических процессов решает свои задачи, связанные с надежной установкой деталей при обработке.

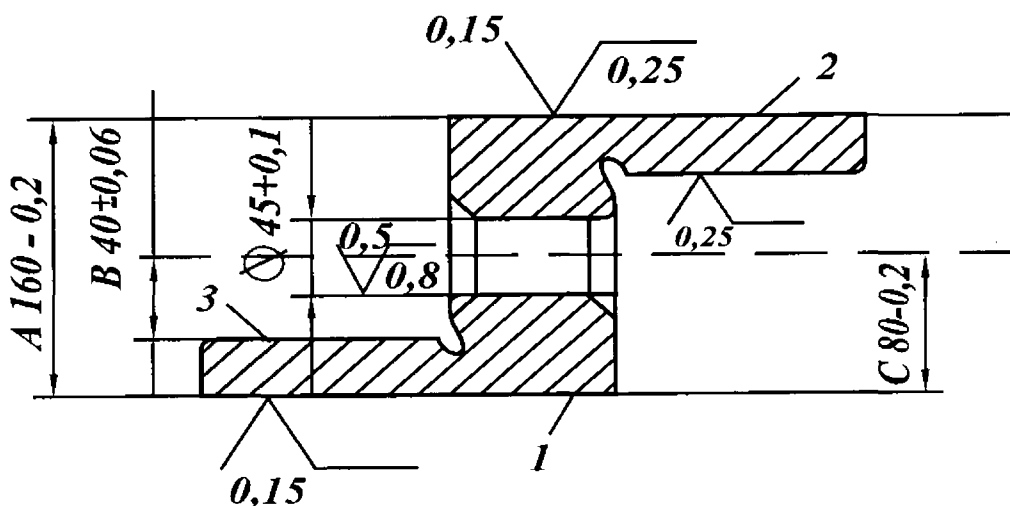


Рис. 3.12. Чертеж детали

При решении этих задач часто не обеспечивается принцип единства баз. В этих случаях технолог, отказавшись реализовать принцип единства баз, обеспечивает принцип их постоянства.

На рис. 3.12 показан чертеж детали. Требуется обеспечить от площадки 3 до оси отверстия $\varnothing 45^{+0,1}$ размер $40^{+0,06}_{-0,06}$ мм.

При выполнении данного размера обеспечить принцип единства баз невозможно. Обработка поверхности 3 может осуществляться только от поверхности 1, а обработка отверстия $\varnothing 45^{+0,1}$ в равной степени может осуществляться от поверхностей 1 и 2. Рассмотрим возможные варианты обработки. Первый – обработка поверхности 3 и отверстия $\varnothing 45^{+0,1}$ осуществляется от постоянной установочной базы 1. Этот вариант соответствует принципу постоянства баз.

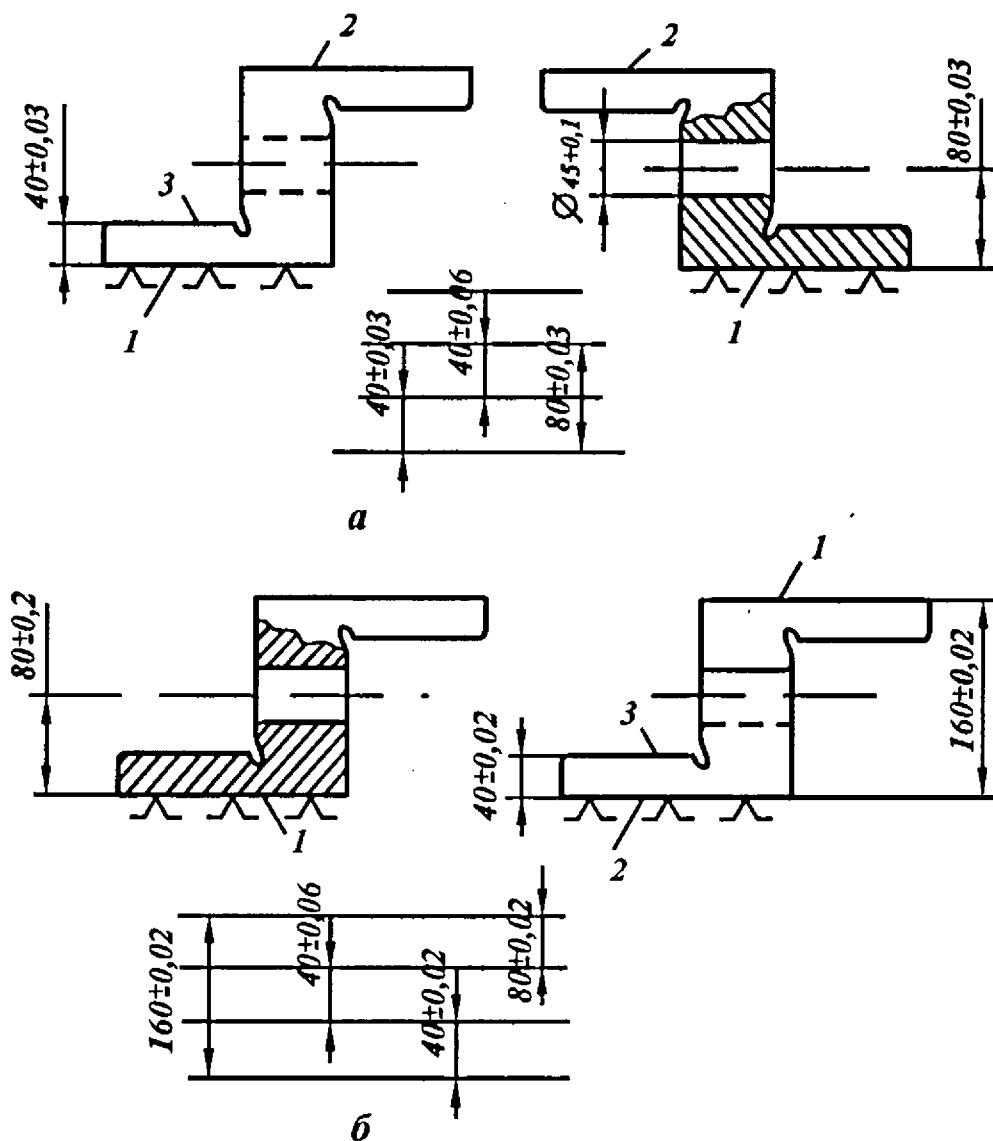


Рис.3.13. Два варианта технологических процессов

Второй вариант – обработка поверхности 3 производится от поверхности 1, а обработка отверстия $\varnothing 45^{+0,1}$ – от поверхности 2. Здесь принцип постоянства баз нарушен.

На рис. 3.13 показаны технологические эскизы обработки указанных поверхностей и приведены размерные цепи. Нарушение принципа единства баз требует ужесточения технологических размеров.

В первом варианте обработки (рис. 3.13, а) технологические размеры с ужесточенными допусками поставлены от одной установочной базы (поверхность 1). При такой схеме базирования точность замыкающего звена находится в пределах заданного допуска $40^{+0,06}_{-0,06}$ мм.

Обработка отверстия и фрезерование площади 3 от разных установочных баз вызывает дополнительную погрешность. В технологическую размерную цепь в данном варианте входит размер $160_{-0,02}$.

Для обеспечения точности замыкающего звена $40^{+0,06}_{-0,06}$ мм размеры 160, 80 и 40 должны быть изготовлены с допусками, ужесточенными до $\pm 0,02$ мм (рис. 3.13, б).

Принцип постоянства установочной базы оправдывает себя при условии, если эта постоянная база имеет погрешность установки детали, близкий к нулю. Кроме того, постоянная база должна быть пригодна для установки детали на разных операциях. Если на детали такой поверхности нет, то необходимо специально создать такую поверхность, предназначенную только для целей установки детали. Такая поверхность называется вспомогательной установочной базой.

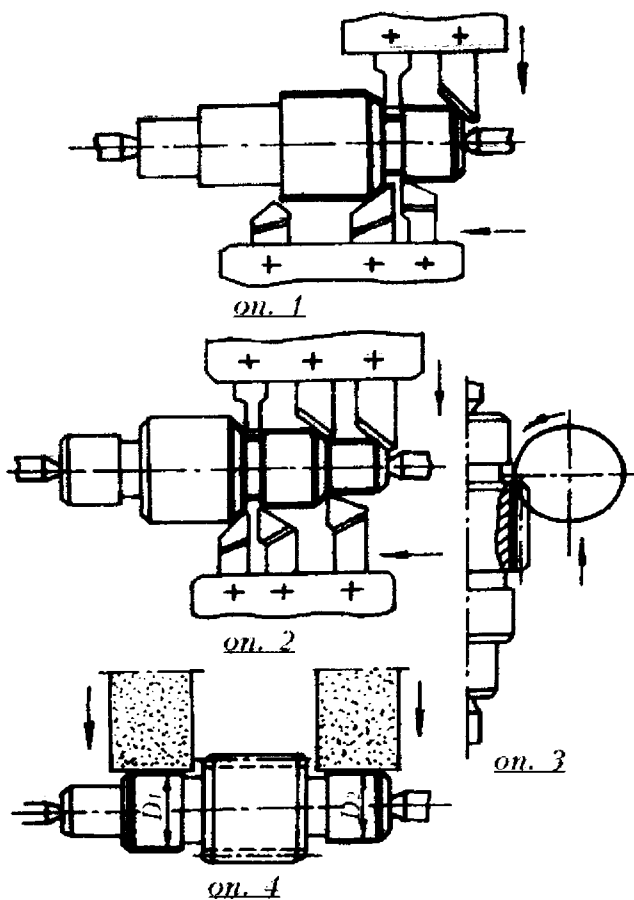


Рис. 3.14. Технология обработки ступенчатого вала

На рис. 3.14 представлен технологический процесс обработки ступенчатого вала при обеспечении на всех операциях принципа постоянства баз.

Центровые фаски являются вспомогательной установочной базой. Действительно, при обработке ступенчатого вала на двух много-резцовых станках установочной базой являются центровые отверстия. На операции круглого шлифования шеек под подшипники и фрезеровании зубчатого венца в качестве установочной базы также используются центровые отверстия.

На рис. 3.15, *а* дан операционный эскиз детали, в котором контурной линией показан уступ глубиной $15^{+0,3}$ мм.

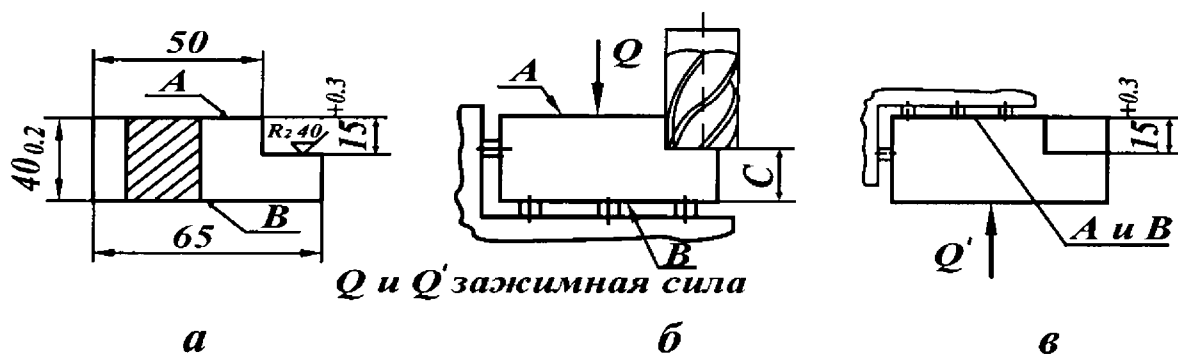


Рис. 3.15. Обработка уступа при различных схемах базирования

При данной простановке размеров измерительной базой является поверхность *A*. Обработка выполняется на фрезерном станке, настроенном на размер, т. е. при установке фрезы на расстоянии *C* от установочной базы *B* (рис. 3.15, *б*).

При данной схеме базирования положение измерительной базы может изменяться в пределах допуска 0,2 мм размера 40 мм. Погрешность базирования равна допуску на размер 40 мм.

Если в качестве постановочной базы использовать поверхность *A* (рис. 3.15, *в*), то в данном случае погрешность базирования будет равна нулю. В этом случае обеспечен принцип совмещения баз, т. е. конструкторская база совмещена с измерительной и установочной.

Однако следует заметить, что данная схема базирования является нетехнологичной, ибо проектировать приспособление, в котором сила прижима детали направлена в сторону, противоположную силе резания, недопустимо.

На рис. 3.16 показана схема базирования цилиндрической детали на призму. Диаметр цилиндрической детали, на которой надо

профрезеровать лыску, изменяется в пределах допуска TD . Изменение диаметров в пределах допуска вызывает при базировании вала смещение центров окружностей в пределах $C'C''$. Смещение центров вносит погрешность в координирующие размеры лыски h_1, h_2 и h_3 .

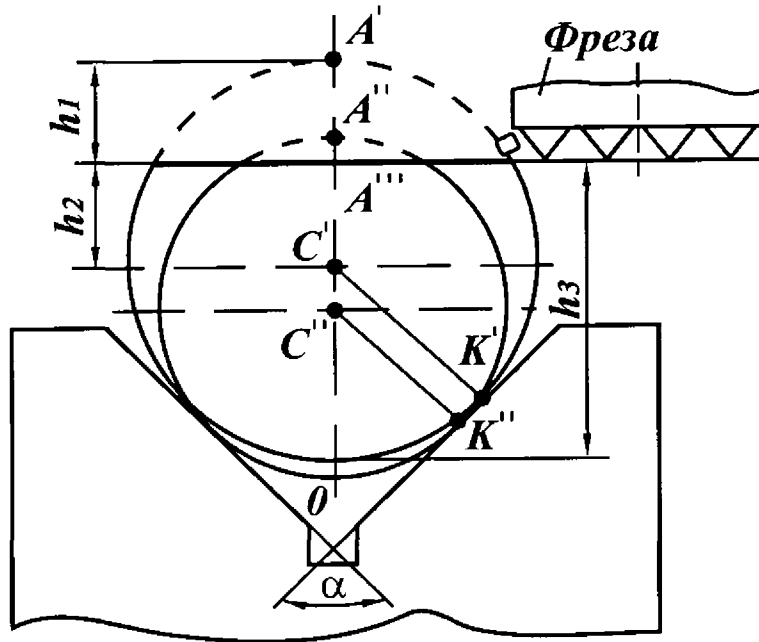


Рис. 3.16. Расчетная схема для определения погрешностей базирования при установке на призму

Изменение размера h_1 в результате погрешности базирования равно $\Delta h_1 = A'A''$.

Из расчетной схемы рис. 3.16 погрешность базирования можно найти из выражения

$$\begin{aligned} \Delta h_1 &= OA' - OA'' = (OC' + C'A') - (OC'' - C''A'') = \\ &= \left(\frac{C'K'}{\sin \frac{\alpha}{2}} + C'K' \right) - \left(\frac{C''K''}{\sin \frac{\alpha}{2}} + C''A'' \right) = \\ &= \frac{D_{\max}}{2} \left(\frac{1}{\sin \frac{\alpha}{2}} + 1 \right) - \frac{D_{\min}}{2} \left(\frac{1}{\sin \frac{\alpha}{2}} + 1 \right) = \frac{TD}{2} \left(\frac{1}{\sin \frac{\alpha}{2}} + 1 \right). \end{aligned} \quad (3.1)$$

Погрешности базирования, приводящие к изменению размеров h_2 и h_3 , определяются по формулам

$$\Delta h_2 = \frac{TD}{2} \left(\frac{1}{\sin \frac{\alpha}{2}} \right), \quad (3.2)$$

$$\Delta h_3 = \frac{TD}{2} \left(\frac{1}{\sin \frac{\alpha}{2}} - 1 \right).$$

Если при фрезеровании лыски цилиндрическую заготовку установить в центрах, то погрешность базирования будет составлять половину допуска на диаметральный размер $\Delta E_{\delta} h = \frac{TD}{2}$ (рис. 3.17, а).

Если базирование вала производить в тисках с плоскими губками и с упором вала на основание тисков, то погрешность базирования будет равна нулю, так как измерительная база при обработке партии заготовок положения не меняет (рис. 3.17, б).

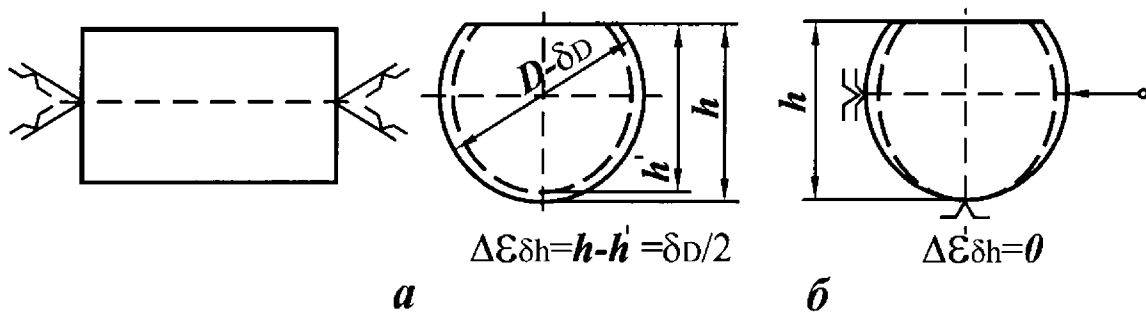


Рис. 3.17. Схема базирования детали в центрах (а) и в тисках (б)

При обработке паза на втулке 1 с базированием ее по отверстию оправки 2 (рис. 3.18, а) с радиальным зазором Δ погрешность базирования

$$\Delta E_{\delta} = \frac{TD}{2} + 2\varepsilon + Td_0 + Td_{\text{опр}} + 2\Delta,$$

где ε – эксцентриситет оси отверстия втулки относительно наружного диаметра D ; Td_0 – допуск на диаметр отверстия втулки; $Td_{\text{опр}}$ – допуск на посадочный диаметр оправки; Δ – минимальный радиальный зазор между диаметром оправки и посадочным диаметром втулки.

Если втулку базировать на разжимную оправку (рис.3.18,б), то погрешность базирования ΔE_6 будет равна $\Delta E_6 = \frac{TD}{2} + 2\varepsilon$.

Погрешность закрепления ΔE_3 связана с колебаниями контактных деформаций элементов цепи, через которую передается сила закрепления.

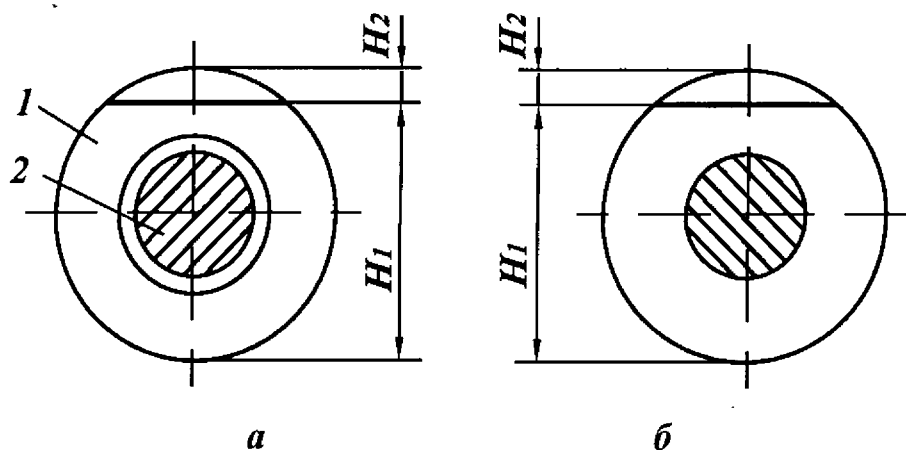


Рис. 3.18. Схема базирования на гладкой оправке (а) и разжимной (б)

Величина смещения из-за контактных деформаций определяется по формуле

$$y = cQ^n \cos \alpha, \quad (3.4)$$

где c – коэффициент, характеризующий условия контакта в зависимости от изменения твердости материала и формы опор (сферическая, плоская, с рифлениями и т. д.); Q – сила, действующая на опору; α – угол между направлением наибольшего смещения и направлением выдерживаемого размера.

При обработке партии заготовок сила зажима может изменяться от Q_{max} до Q_{min} . Разность y_{max} и y_{min} является погрешностью закрепления. Погрешности закрепления относятся к категории случай-

ных величин, поэтому суммирование их следует выполнять не алгебраически, а по правилу квадратного корня $\Delta E_3 = \sqrt{y_1^2 + y_2^2}$.

Уменьшение погрешности закрепления может быть достигнуто путем стабилизации силы зажима.

Третьей составляющей погрешности установки является погрешность приспособления $\Delta E_{\text{пр}}$.

Погрешность приспособления включает неточность изготовления базирующих элементов приспособления $\Delta E_{\text{пр1}}$, износ этих элементов $\Delta E_{\text{пр2}}$ и погрешность установления самого приспособления на станке $\Delta E_{\text{пр3}}$. В условиях серийного производства, при периодической смене приспособления, погрешность приспособления является случайной величиной. Она определяется по правилу квадратного корня, т. е.

$$\Delta E_{\text{пр}} = \sqrt{\Delta E_{\text{пр1}}^2 + \Delta E_{\text{пр2}}^2 + \Delta E_{\text{пр3}}^2}. \quad (3.5)$$

Проведенный анализ показывает, что нарушение принципов совмещения или постоянства баз вызывает погрешности обработки. Для определения этих погрешностей необходимо производить расчет размерных цепей.

ГЛАВА 4

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РАЗМЕРНЫЕ ЦЕПИ

При проектировании технологических процессов часто возникает необходимость расчета размерных цепей для определения операционных размеров. Отказавшись от совмещения технологических, конструкторских и измерительных баз, технолог вынужден производить перерасчет операционных размеров, ужесточая при этом допуски на их изготовление.

4.1. РАСЧЕТЫ РАЗМЕРНЫХ ЦЕПЕЙ

Связь между размерами представляется размерными цепями. В каждой замкнутой размерной цепи различают замыкающий и составляющие размеры (звенья). Замыкающим называют размер, который непосредственно не выдерживают, а его получают в результате выполнения составляющих размеров.

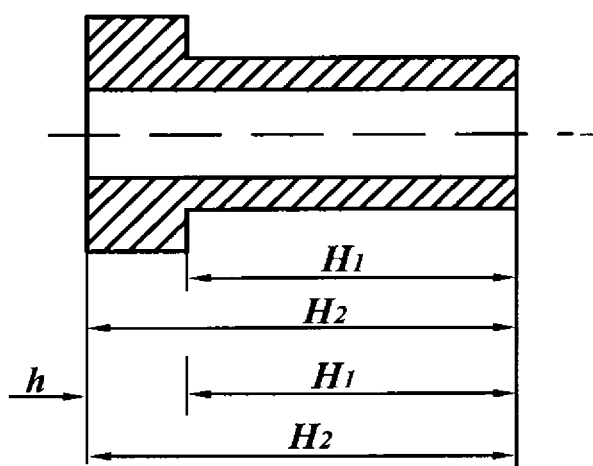


Рис. 4.1. Чертеж втулки и размерная цепь

На рис. 4.1 показаны чертеж втулки и размерная цепь, содержащая два составляющих размера H_1 и H_2 и замыкающий h .

Уравнение размерной цепи имеет вид

$$h = H_2 - H_1.$$

Составляющие размеры, при увеличении которых увеличивается замыкающий размер, называются увеличивающими размерами. В уравнении размерной цепи увеличивающие размеры пишут со знаком плюс, и, наоборот, размеры, при увеличении которых замыкающий размер уменьшается – со зна-

ком минус. Чтобы найти предельные значения замыкающего размера, пользуются предельными значениями составляющих размеров. В нашем случае

$$h_{\max} = H_{2\max} - H_{1\min},$$

$$h_{\min} = H_{2\min} - H_{1\max}.$$

Допуск замыкающего размера Th , равный разности предельных значений ($Th = h_{\max} - h_{\min}$), всегда равен сумме допусков составляющих размеров

$$h_{\max} - h_{\min} = (H_{2\max} - H_{2\min}) + (H_{1\max} - H_{1\min}),$$

$$Th = TH_2 + TH_1.$$

Размерная цепь, выражающая связь размеров на чертеже детали, называется конструкторской цепью. Размерная цепь технологических операционных размеров называется технологической размерной цепью. В конструкторских размерных цепях замыкающий размер имеет самую большую погрешность. Величина этой погрешности равна сумме погрешностей всех размеров размерной цепи.

На рабочих чертежах детали замыкающие размеры обычно не проставляют. В технологических размерных цепях замыкающими звеньями являются размеры, заданные на чертеже детали. Таким образом, составляющие размеры в конструкторской размерной цепи становятся замыкающими в технологической размерной цепи. В конструкторских размерных цепях по заданным значениям составляющих размеров определяется замыкающий размер. Решение этой задачи не вызывает особых затруднений. При расчете технологических размерных цепей задачу приходится решать в обратной постановке, а именно: по заданным значениям замыкающего размера определяют значение составляющих операционных размеров. При такой постановке задачи сумма допусков на составляющие размеры не должна превышать допуск на замыкающий размер. Следовательно, при заданном значении допуска на замыкающий размер увеличение количества составляющих звеньев должно сопровождаться уменьшением допусков на операционные размеры.

В зависимости от расположения размеров размерные цепи подразделяются на линейные, состоящие из взаимно параллельных ли-

нейных размеров; угловые, звеньями которых являются угловые размеры; плоские размерные цепи, звенья которых расположены в одной или нескольких параллельных плоскостях; пространственные, звенья которых находятся в непараллельных плоскостях.

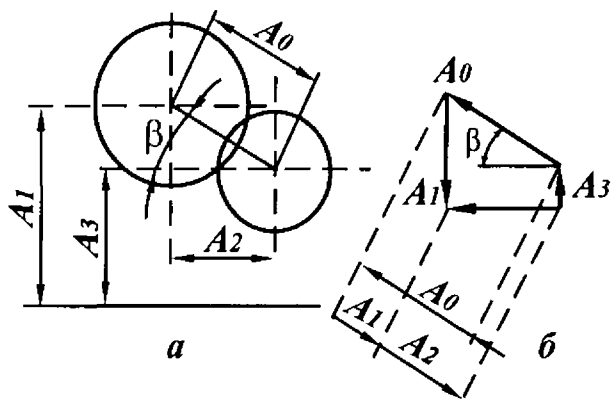


Рис. 4.2. Плоская размерная цепь

На рис. 4.2 показана плоская размерная цепь, часть звеньев которой расположена под углом к остальным звеньям.

На рис. 4.2, б плоская размерная цепь приведена к обычной линейной размерной цепи с параллельными звеньями. Расчет технологических размерных цепей рассмотрим на конкретных примерах.

Пример 1. На рис.4.3 изображен чертеж детали и технологические эскизы обработки. Согласно приведенной размерной схеме, (рис.4.3, в) уравнение размерной цепи имеет вид

$$H_3 - h + H_2 - H_1 = 0.$$

Звено h на чертеже ограничено допуском $Th = \pm 0,1$, поэтому при определении допусков на технологические размеры TH_1 , TH_2 и TH_3 следует принимать допуск Th в качестве замыкающего. Из анализа рабочего чертежа видно, что размер H_1 имеет допуск $TH_1 = 0,3$ мм. При таком значении допуска на размер H_1 сумма всех составляющих звеньев будет значительно больше допуска замыкающего звена ($Th = 0,2$ мм). Следовательно, возникает необходимость ужесточения допуска на размер H_1 до

$$TH_1 = 0,07 \cdot (H_1 = 45 - 0,07).$$

Предельные значения размера замыкающего звена

$$h_{\max} = H_{2\max} + H_{3\max} - H_{1\min},$$

$$h_{\min} = H_{2\min} + H_{3\min} - H_{1\max}.$$

Известно, что

$$h_{\max} = 3^{+0,1} = 3,1 \text{ мм},$$

$$h_{\min} = 3_{-0,1} = 2,9 \text{ мм}.$$

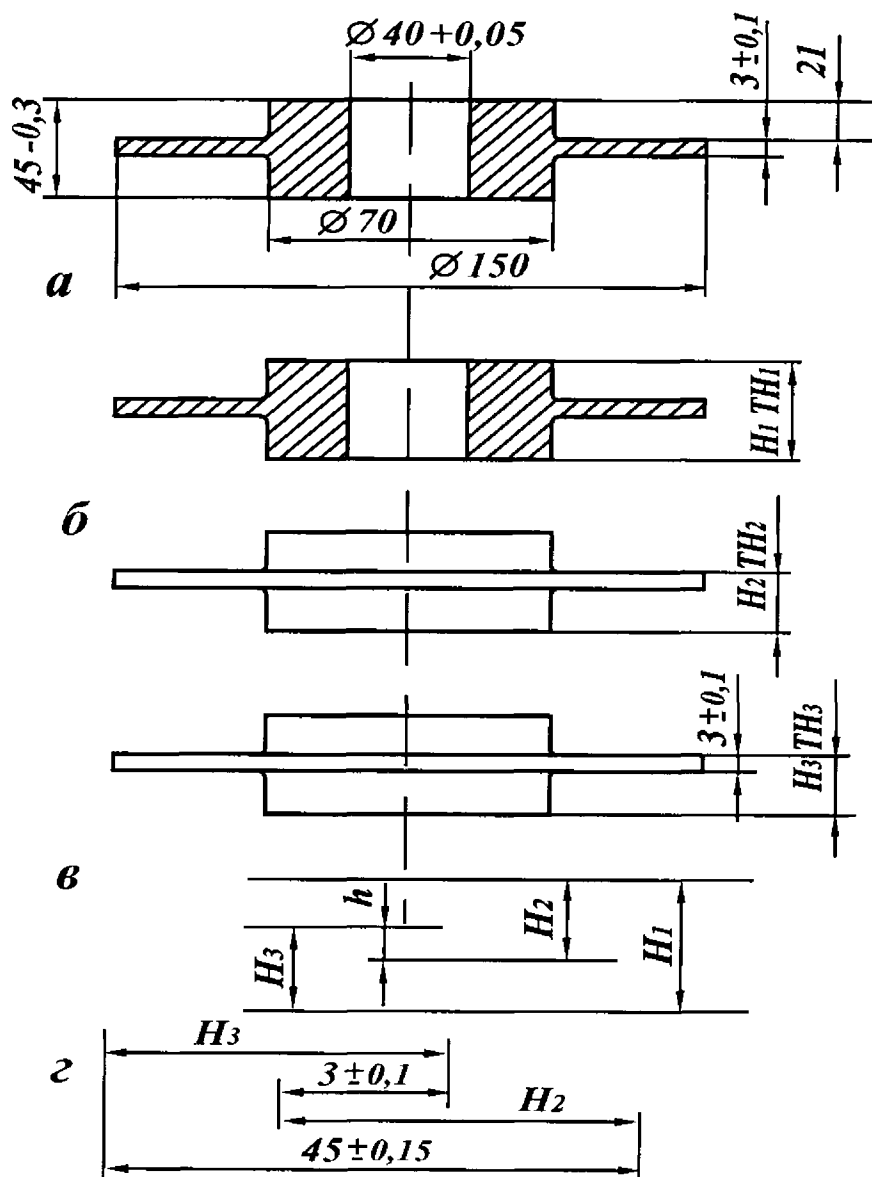


Рис.4.3. Чертеж детали (а) и операционные эскизы (б)

Симметричное расположение обрабатываемых поверхностей диска позволяет приравнять технологические размеры $H_2 = H_3$.

Тогда

$$2H_{2,3\max} = 3,1 + 44,93 = 48,03,$$

$$2H_{2,3\min} = 2,9 + 45,00 = 47,90.$$

Откуда

$$H_{2\max} = H_{3\max} = 24,015,$$

$$H_{2\min} = H_{3\min} = 23,95.$$

Допуск на операционные размеры определяется

$$TH_{2,3} = H_{2,3\max} - H_{2,3\min} = 0,065 \text{ мм.}$$

Таким образом, операционные размеры должны быть:

$$\text{на операции №1 размер } H_1^{-TH_1} = 45_{-0,07} \text{ мм,}$$

$$\text{на операции №2 размер } H_2^{-TH_2} = 24,015_{-0,065} \text{ мм,}$$

$$\text{на операции №3 размер } H_3^{-TH_3} = 24,015_{-0,065} \text{ мм.}$$

Изложенная методика является не единственной. При расчете технологических размерных цепей бывает удобнее пользоваться не предельными значениями размеров, а использовать средние их значения. Например, размерную цепь можно записать, как показано на рис.4.3, г. Из нее сразу находится

$$2H_{2,3 \text{ ср}} = 44,85 + 3 = 47,85 \text{ мм,}$$

$$H_{2 \text{ ср}} = H_{3 \text{ ср}} = 23,925 \text{ мм.}$$

Зная, что размер $3 \pm 0,1$ получается как замыкающий, распределяют его допуск между всеми составляющими размерами. Если распределить его поровну (из тех же соображений, что были изложены выше, т.е. принять $TH_1 = TH_2 = TH_3 = 0,066 = \pm 0,033$), то сразу найдутся:

$$H_{1 \text{ ср}} \pm \frac{TH_1}{2} = 44,85 \pm 0,033 \text{ мм,}$$

$$H_{2 \text{ ср}} \pm \frac{TH_2}{2} = H_{3 \text{ ср}} \pm \frac{TH_3}{2} = 23,925 \pm 0,033 \text{ мм.}$$

Полученные таким образом размеры записывают в операционных картах в соответствии с общими правилами (допуск должен быть направлен «в тело» детали).

На операции № 1 $44,85 \pm 0,033 = 44,883_{-0,066}$ мм.

На операциях № 2 и № 3 размер $23,925 \pm 0,033 = 23,958_{-0,066}$ мм.

Пример 2. На рис. 4.4, *а* показан чертеж детали, а на рис. 4.4, *б* – операционный эскиз на обработку паза и растачивание отверстия.

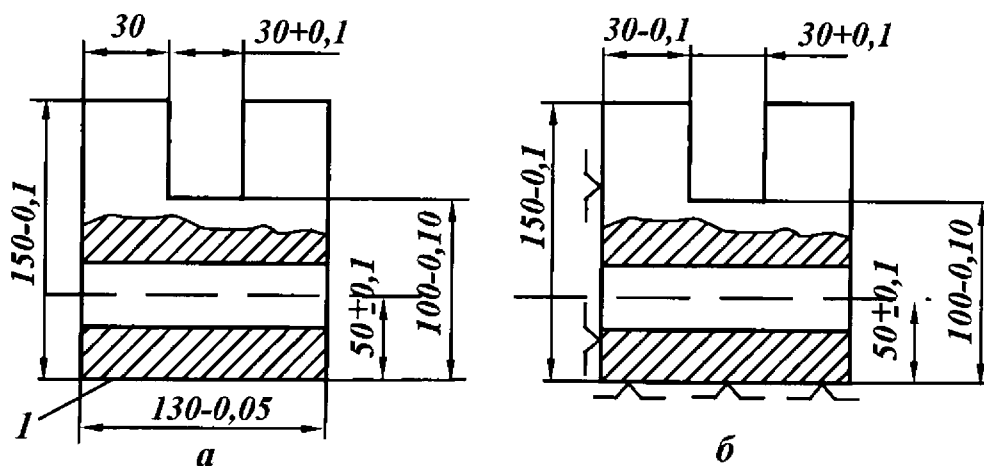


Рис. 4.4. Чертеж детали (*а*) и операционный эскиз (*б*)

Поверхность 1, от которой координируются на чертеже обрабатываемые поверхности, является наиболее удобной установочной базой. На технологическом эскизе размеры проставляются от установочной базы. Следовательно, в данном случае представилась возможность реализовать принцип совмещения баз. При этих условиях обработки ужесточать допуски на технологические размеры не требуется.

Пример 3. На рис.4.5, *а* изображен чертеж детали, а на рис.4.5, *б* – операционный эскиз обработки паза и растачивания отверстия.

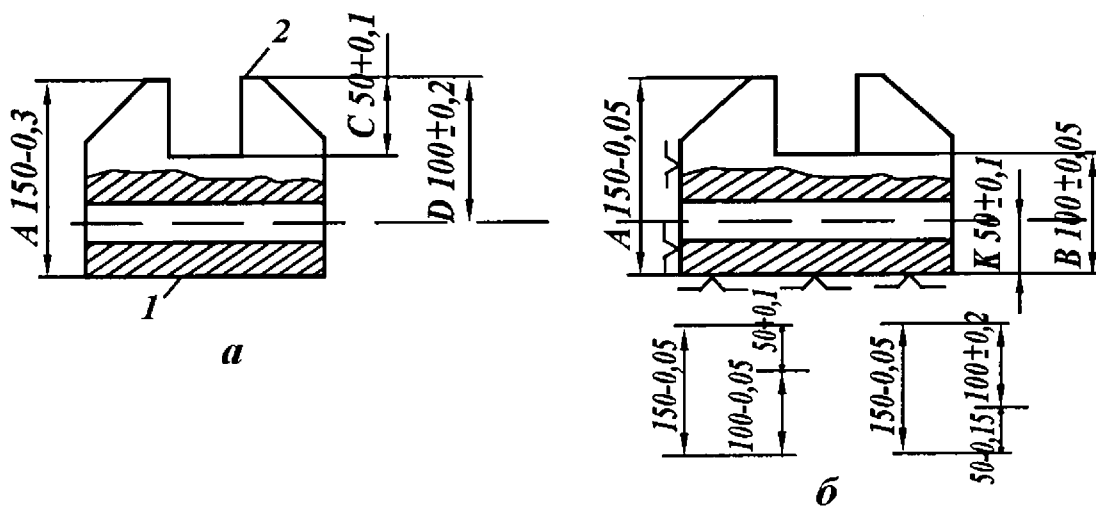


Рис. 4.5. Чертеж детали (*а*) и эскиз обработки (*б*)

Размеры, координирующие глубину паза и расположение отверстия, проставлены от поверхности 2, которая имеет малую опорную поверхность и не может быть использована в качестве установочной базы. Надежную установку и базирование детали обеспечивает поверхность 1. На операционном эскизе размеры проставлены от установочной базы. Следовательно, здесь реализовать принцип единства баз невозможно. Для обеспечения требований, указанных в чертеже, допуски на технологические размеры должны быть ужесточены. Например, для обеспечения точности замыкающего звена $C = 50^{+0,1}$ (размер глубины паза) необходимо допуски на составляющие звенья (размеры A и B) ужесточить до 0,05 мм. На технологическом эскизе допуск на размер A уменьшается в 6 раз.

Пример 4. На рис. 4.6 показаны два способа базирования шатуна на операции фрезерования торца головок.

Торцы головок обрабатываются одновременно двумя фрезами, настроенными на размер B . На данной операции установочной базой является стержень, соединяющий головки.

В качестве установочной базы на приспособлении часто используют неподвижную плоскость. Относительно этой плоскости настраивают режущие инструменты (фрезы) на размеры A_1 и A_2 (рис.4.6,*а*) с целью обеспечения требуемой толщины головки $B_{ТВ}$. Допуск замыкающего звена равен сумме допусков составляющих звеньев $TB = TA_1 + TA_2$.

Штампованная заготовка размером $B = 30 \div 50$ мм пятнадцатого квалитета точности имеет допуск $TB = 0,84 \div 1,0$ мм. Следовательно, колебания размеров A_1 и A_2 могут достигать $0,42 \div 0,5$ мм. Размеры A_1 и A_2 поставлены от поверхности, полученной при штамповке. При такой схеме базирования ось стержня будет смещаться относительно торцов головок шатуна на $0,42 \div 0,5$ мм. Такую асимметрию исправить на последующих операциях шлифования практически невозможно.

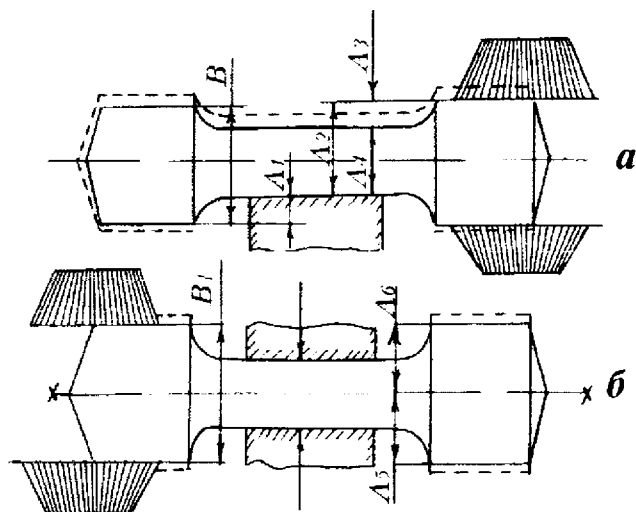


Рис.4.6. Способы базирования шатуна при обработке торцов головок

Чтобы избежать погрешностей при обработке, надо изменить схему базирования. В качестве установочной базы следует использовать скрытую базу – ось $X \cdots X$ (рис. 4.6, б). Такая схема базирования обеспечивается при установке шатуна в самоцентрирующиеся тиски.

Пример 5. При обработке уступа на глубину $a = 15^{+0,43}$ (рис.4.7,а) заготовку устанавливают на поверхность B .

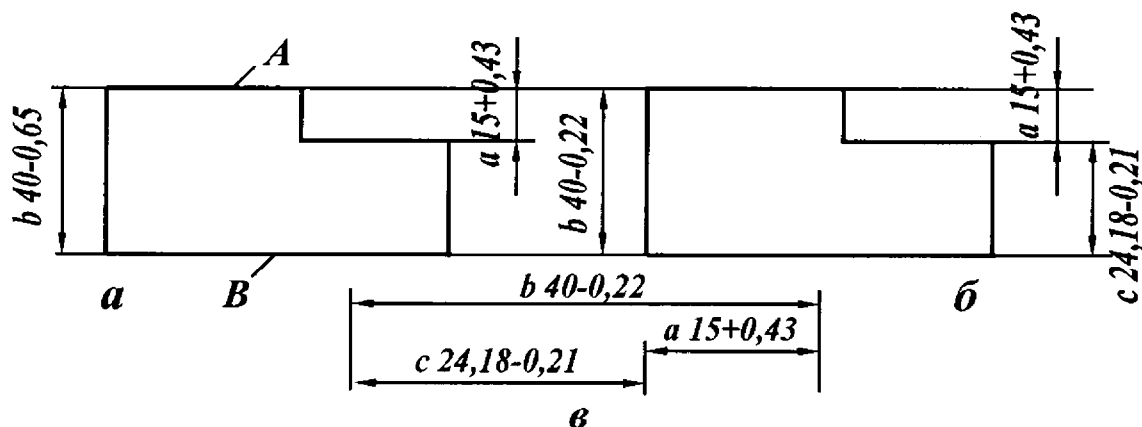


Рис. 4.7. Чертеж детали (а) и эскиз обработки (б)

Поверхность обрабатываемого уступа связана размером $15^{+0,43}$ с верхней плоскостью A . Эта плоскость уступа является конструкторской и измерительной базой. Установочная база – поверхность B – не совпадает с конструкторской базой.

На станках, настроенных на размер, или на станках с ЧПУ поверхность, на которую установлена деталь, является базой для настройки станка. Поэтому размер $15^{+0,43}$, который не связан с этой базой, не может быть обеспечен автоматически, так как база A , от которой зависит этот размер, – плавающая. Величина ее колебания зависит от точности изготовления размера B в пределах допуска $TB = 0,65$, который обеспечивается на предыдущей операции. На операционном эскизе поставлен технологический размер C .

Для определения допуска на размер C необходимо решить размерную цепь (рис. 4.7,в). В данной размерной цепи размер $a = 15^{+0,43}$ является замыкающим, а размеры B и C – составляющими звеньями. Допуск замыкающего звена равен сумме допусков составляющих звеньев $TA = TB + TC$.

После подстановки соответствующих значений,имеем

$$TC = 0,43 - 0,65 = -0,22.$$

Поскольку допуск – величина существенно положительная и отрицательной быть не может, то полученное уравнение может быть решено при условии увеличения допуска TA или уменьшения допуска – TB . Допуск на величину уступа TA задан конструктором и не может быть подвергнут изменению. Поэтому единственный способ решения поставленной задачи – это уменьшение допуска вычитаемого размера TB . Уменьшение допуска TB следует производить таким образом, чтобы сложность выполнения размеров B и C была одинаковой.

Принимая допуск на размер B равным $TB = 0,22$, определим предельные значения технологического размера C :

$$\begin{aligned} a &= b - c; \quad a_{\max} = b_{\max} - c_{\min}; \\ c_{\min} &= b_{\max} - a_{\max} = 40 - (15 + 0,43) = 25_{-0,43}; \\ a_{\min} &= b_{\min} - c_{\max}; \\ c_{\max} &= b_{\min} - a_{\min} = 40 - 0,22 - 15 = 25_{-0,22}. \end{aligned}$$

Расчетная величина размера $C = 25_{-0,43}^{-0,22}$.

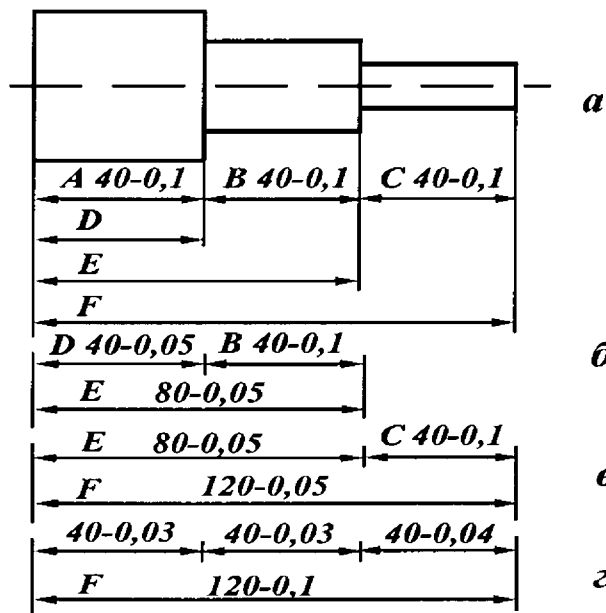
Окончательно принимается ближайшее стандартное значение размера $C = 25_{-0,43}^{-0,22}$. Проверочный расчет на максимум и минимум

$$\begin{aligned} a_{\max} &= 40 - (25 - 0,43) = 15^{+0,43}, \\ a_{\min} &= 40 - 0,22 - (25 - 0,43) = 15^{+0,21} \end{aligned}$$

показывает, что предельные размеры исходного конструкторского размера A находятся в границах предельных размеров, указанных в чертеже.

Пример 6. На рис. 4.8 показан чертеж ступенчатого вала. Линейные размеры конструктор поставил на чертеже в виде цепочки (A, B, C). Обработку данного вала технолог планирует производить на многорезцовом станке. При многорезцовой обработке требуется производить настройку резцов от одной базы. Цепная простановка линейных размеров не позволяет осуществлять настройку многорезцового станка. Поэтому технолог поставил размеры координатным методом, тем самым нарушил принцип совмещения баз. Требуется произвести перерасчет размеров, обеспечивая требования конструктора.

тора. Для определения технологических размеров D и E рассмотрим размерную цепь (рис. 4.8, б). Размер B в данной размерной цепи является замыкающим звеном. Допуск замыкающего звена равен сумме допусков составляющих звеньев $TB = TD + TE$, $0,1 = 0,05 + 0,05$.



Для определения технологического размера F рассмотрим размерную цепь (рис. 4.8, в).

Допуск замыкающего звена (размер C) равен сумме допусков составляющих звеньев

$$TC = TE + TF, \quad 0,1 = 0,05 + 0,05.$$

Пример 7. Рассмотрим решение обратной задачи. Конструктор на чертеже поставил линейные размеры ступенчатого валика (рис. 4.8, а) координатным методом: $D = 40 - 0,1$;

$$E = 80 - 0,1; \quad F = 120 - 0,1.$$

Рис. 4.8. Два варианта простановки размеров на чертеже

Технолог при разработке технологического процесса на эскизе операционной карты поставил в виде цепочки. Требуется определить допуски на операционные размеры A , B и C , обеспечивая при этом требуемую точность размеров, указанных в чертеже. Для определения допусков на операционные размеры A , B , C рассмотрим размерную цепь (рис. 4.8, з). Допуск замыкающего звена размера F равен сумме допусков составляющих звеньев $TF = TA + TB + TC$. Допуск на размер F равен $0,1$ мм. Следовательно, сумма допусков операционных размеров A , B , C должна быть равна $0,1$ мм

$$TF = 0,1 = 0,03 + 0,03 + 0,04.$$

4.2. РАЗМЕРНЫЙ АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Одним из методов повышения точности обработки и улучшения качества поверхностного слоя является проведение размерного анализа технологического процесса.

Размерный анализ технологического процесса позволяет научно обосновать предельные значения технологических размеров, определить операционные припуски, выявить наиболее технологичную (с позиции механической обработки) простановку операционных размеров и минимизировать издержки производства.

К моменту выполнения размерного анализа должен быть разработан технологический процесс, который прошел стадию логической оценки и признан пригодным с позиции основных положений технологии машиностроения для дальнейшей проработки и уточнения.

План обработки должен сопровождаться операционными эскизами. На эскизах проставляются операционные размеры и технологические базы. Последовательное превращение заготовки в готовую деталь характеризует технологический параметр – уточнение.

Уточнения поверхностей различаются по геометрическим размерам εd_0 , шероховатости εRz_0 и взаимному расположению поверхностей $\varepsilon \Delta_0$

$$\varepsilon d_0 = \frac{Td_{заг}}{Td_{дет}}; \quad \varepsilon Rz_0 = \frac{TRz_{заг}}{TRz_{дет}}; \quad \varepsilon \Delta_0 = \frac{T\Delta_{заг}}{T\Delta_{дет}},$$

где $Td_{заг}$, $TRz_{заг}$, $T\Delta_{заг}$ – допуски соответственно на размер, шероховатость и взаимное расположение поверхностей заготовок.

Количество операций или переходов определяется из выражения [12]

$$k_j = \frac{\lg \varepsilon_{0j}}{a},$$

где a – коэффициент ($a = 0,45 \div 0,5$), $j = d; Rz, \Delta$ – индекс, обозначает параметр геометрического размера, параметр шероховатости и параметр взаимного расположения поверхностей.

Между переходами разность квалитетов распределяется по закону прогрессивного убывания.

Технологические размерные цепи наиболее рационально выявлять с помощью теории графов. При этом деталь в процессе ее изготовления рассматривается как геометрическая структура, состоящая из множества поверхностей и связей (размеров) между ними [13,14].

Приоритет в области применения теории графов для расчета технологических размерных цепей принадлежит Б.С. Мордвинову [15].

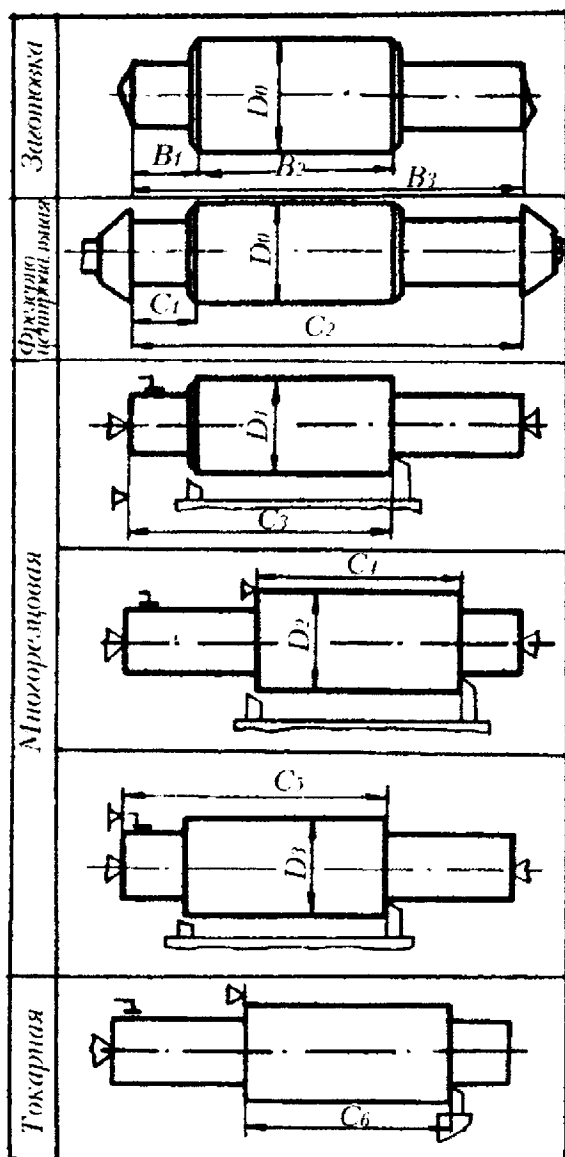


Рис. 4.9. Технология изготовления ступенчатого вала

Методику проведения размерного анализа технологических процессов рассмотрим на конкретном примере. На рис. 4.9 представлены эскизы технологического процесса обработки ступенчатого валика. Заготовка ступенчатого валика – штамповка повышенной точности $jT16$. Допуск на диаметр 50 заготовки $T_{50} = 1,9$ мм; на линейный размер 165 $T_{165} = 2,2$ мм; на размер 75 $T_{75} = 1,9$ мм (табл. 1) [16] (табл. приложения 14).

Общее уточнение диаметра и линейных размеров равны

$$\epsilon_{d=50} = \frac{1,5}{0,06} = 31,7;$$

$$\epsilon_{l=165} = \frac{2,2}{0,8} = 2,75;$$

$$\epsilon_{l=75} = \frac{1,9}{0,15} = 12,7.$$

Количество переходов, необходимое для обеспечения требуемой точности размеров детали определяется из условия наибольшего уточнения:

$$k_{d=50} = \frac{\lg \epsilon_{d=50}}{0,5} = \frac{1,5}{0,5} = 3; \quad k_{l=75} = \frac{\lg \epsilon_{l=75}}{0,5} = \frac{1,1}{0,5} = 2,2.$$

Для обеспечения точности изготовления линейных размеров принимаем число проходов, равное 2 (черновая обработка и чистовая обработка торцев), а для обеспечения диаметральной точности – число проходов, равное 3.

Разность квалитетов заготовки и детали

$$(n_{кв\ d=50} = jT_{заг} - jT_{дет} = 16 - 9 = 7;$$

$$n_{кв\ l=75} = jT_{заг} - jT_{дет} = 16 - 10 = 6)$$

распределяем по закону прогрессивного убывания

$$\Delta jT_{d=50} = 7 = 4 + 2 + 1; \Delta jT_{l=75} = 6 = 4 + 2.$$

Квалитеты точности по проходам:

а) для диаметра $50_{-0,06}$

1. Штамповка..... $-jT16$
2. Механическая обработка
 - 1-й проход..... $-jT12$
 - 2-й проход..... $-jT10$
 - 3-й проход..... $-jT9$

б) для линейного размера $l=75-0,15$

1. Штамповка..... $-jT16$
2. Механическая обработка
 - 1-й проход..... $-jT12$
 - 2-й проход..... $-jT10$

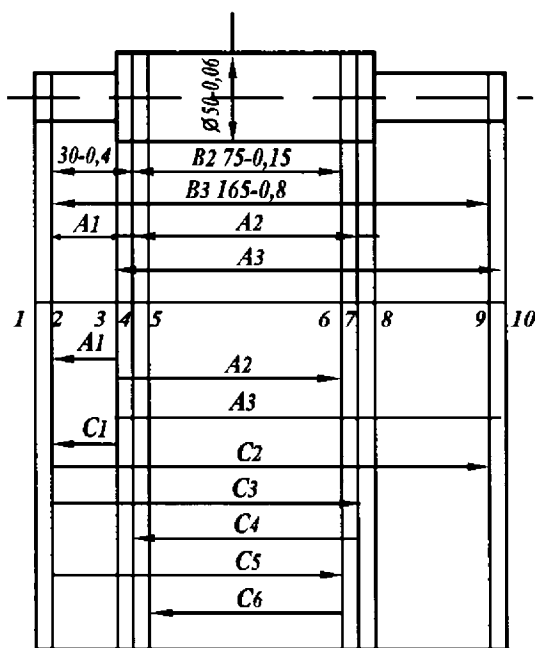


Рис. 4.10. Размерная схема технологического процесса

Размерная схема технологического процесса обработки торцевых поверхностей ступенчатого валика показана на рис.4.10. При расчете линейных операционных размеров рационально использовать теорию графов. Граф представляется в виде символической записи: граф – это точки, соединенные линиями. При размерном анализе технологического процесса точки (вершины графа) соответствуют поверхностям детали; линии, соединяющие эти точки (ребра графа), – соответствуют размерам или допускам.

Если принять поверхности детали за вершины графа, а связи (размеры между ними) – за ребра, то чертеж детали с конструкторскими и технологическими размерами можно представить в виде двух деревьев. Дерево с конструкторскими размерами и припусками (рис. 4.11, б) называется исходным, а дерево с технологическими размерами (рис. 4.11, а) – производным технологическим.

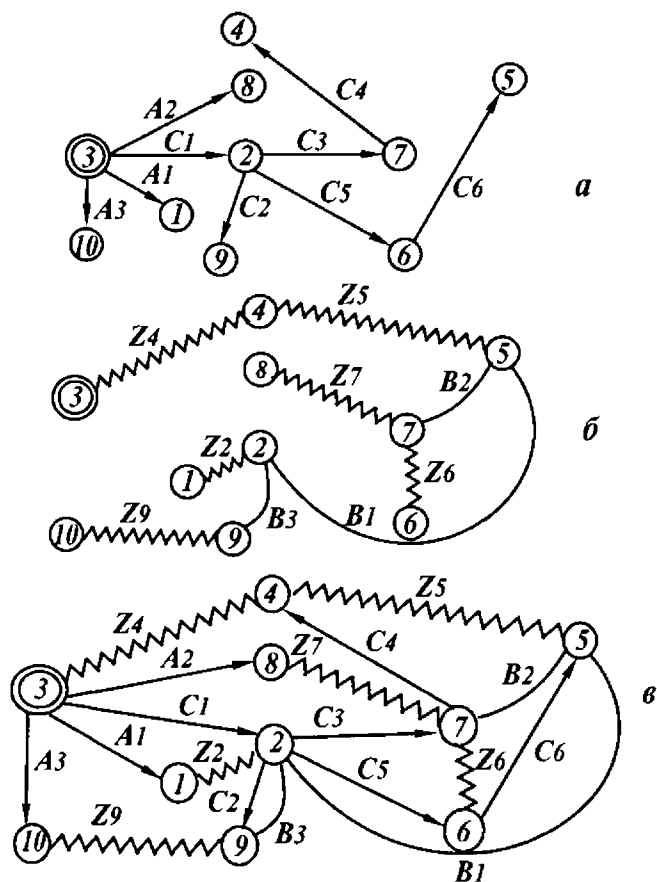


Рис. 4.11. Исходный (а) производный (технологический) и совмещенный граф

После построения исходного и производного деревьев производится проверка правильности их построения:

- число вершин у каждого дерева должно быть равно числу поверхностей на размерной схеме технологического процесса;
- число ребер у каждого дерева должно быть одинаковым и равным числу вершин без единицы (-1);
- к каждой вершине производного дерева, кроме корневой, должна подходить только одна стрелка ориентированного ребра, а к корневой вершине не должна подходить ни одна стрелка;
- деревья не должны иметь разрывов и замкнутых контуров.

Эти условия позволяют обнаружить ошибки в технологии или чертеже. Например, разрыв между вершинами свидетельствует об отсутствии необходимых размеров в принятой технологии или на чертеже. Наличие замкнутых контуров свидетельствует о наличии лишних размеров. Совмещенный граф (рис. 4.11, в) представляет собой геометрическую структуру технологического процесса или его математическую модель. В совмещенном графе размерные связи превращаются в явные размерные цепи, так как информация, которую несет граф совмещенных деревьев, позволяет производить все необходимые расчеты. Замкнутые кон-

туры на совмещенном графе образуют размерные технологические цепи. В размерных цепях ребра исходного дерева – замыкающие звенья, а ребра производного дерева – составляющие звенья. В каждой замкнутой размерной цепи должно быть только одно ребро исходного дерева (конструкторский размер или припуск).

Вершины (поверхности) обозначаются окружностью с указанием внутри соответствующего номера поверхности. Ребра исходного дерева изображаются в виде дуг, если они являются конструкторскими размерами, или в виде волнистых линий – если являются размерами припусков.

По объединенному графу определяются знаки составляющих звеньев. Для этого применяют следующее правило. Звену присваивается знак минус, если обход по замкнутому контуру начинается от вершины с большим номером к вершине с меньшим номером, и, наоборот, при движении по замкнутому контуру от вершины с меньшим номером к вершине с большим номером звену присваивается знак плюс.

Расчет технологических размеров по совмещенному графу (см. рис. 4.11,б) следует начинать с двухзвенной цепи. В рассматриваемом примере в качестве корня дерева является поверхность 3, к которой не подходит ни одна стрелка. Из нее выходят стрелки размеров C_1 , A_1 , A_2 , A_3 , которые направлены соответственно к вершинам 2, 1, 8, 10. Из вершины 2 выходят стрелки C_2 , C_3 , C_5 к вершинам 9, 7, 6. Из вершин 6 и 7 выходят стрелки C_6 и C_4 к вершинам 5 и 4. Уравнения для расчета технологических размеров сведены в табл. 4.1.

Т а б л и ц а 4.1

№ п/п	Расчетные уравнения	Исходные уравнения	Определяемый параметр
1	$-B_3+C_2=0$	$B_3=C_2$	C_2
2	$-B_2+C_6+Z_6=0$	$B_2=C_6+Z_6$	C_6
3	$-B_1+C_5-C_6=0$	$B_1=C_5-C_6$	C_5
4	$-Z_6-C_5+C_3=0$	$Z_6=C_3-C_5$	C_3
5	$-Z_5+C_4-C_3+C_5-C_6=0$	$Z_5=C_4+C_5-C_3-C_6$	C_4
6	$-Z_4-C_1+C_3-C_4=0$	$Z_4=C_3-C_1-C_4$	C_1
7	$-Z_2+A_1-C_1=0$	$Z_2=A_1-C_1$	A_1
8	$-Z_7-C_3+C_1+A_2=0$	$Z_7=A_2+C_1-C_3$	A_2
9	$-Z_9-C_2+C_1+A_3=0$	$Z_9=A_3+C_1-C_2$	A_3

4.3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИАМЕТРАЛЬНЫХ ОПЕРАЦИОННЫХ РАЗМЕРОВ ВАЛА С ПОМОЩЬЮ ГРАФОВ

Размерная схема технологического процесса обработки диаметра ступенчатого вала $\varnothing 50 - 0,06$ изображена на рис.4.12,а.

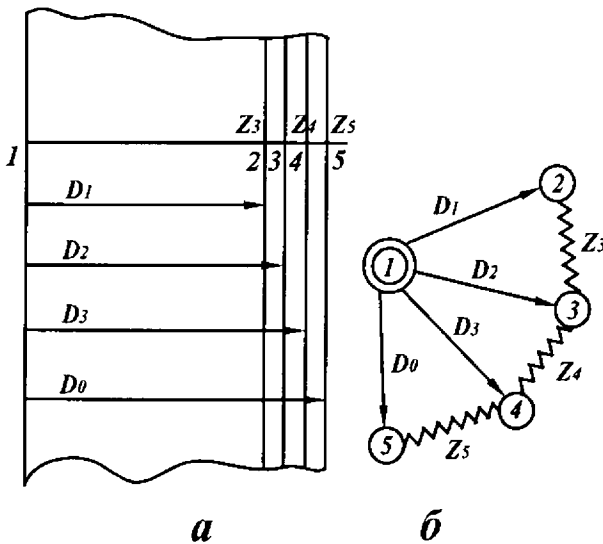


Рис. 4.12. Размерная схема (а) и совмещенный граф (б) для определения диаметральных операционных размеров

Совмещенное дерево, представляющее собой структуру технологического процесса обработки диаметра вала, показано на рис. 4.12, б.

В качестве корня дерева выбрана поверхность 1, к которой не подходит ни одна стрелка. Расчет технологических размеров следует начинать с замкнутого контура, включающего заданный в чертеже диаметр $D_1 = 50_{-0,06}$.

Уравнение для расчета технологического размера D_2 имеет вид

$$D_2 - Z_3 - D_1 = 0.$$

Минимальный припуск Z_3 выбирают из табл. (приложение 4). Для чистового обтачивания $Z_3 = 0,6$ мм

$$Z_{3\min} = D_{2\min} - D_{1\max};$$

$$D_{2\min} = Z_{3\min} + D_{1\max} = 50,6 \text{ мм.}$$

Из табл. (прилож. 14) допуск для десятого качества $TD_2 = 0,12$ мм. Следовательно, $D_2 = 50,72_{-0,12}$ мм. Для расчета технологического размера D_3 уравнение имеет вид $Z_4 - D_3 + D_2 = 0$.

$$Z_{4\min} = D_{3\min} - D_{2\max}.$$

Откуда

$$D_{3\min} = Z_{4\min} + D_{2\max}.$$

Минимальный припуск $Z_{4\min}$ (получистовое растачивание) определяется как среднее арифметическое величин Z_3 и Z_5 . Минимальный припуск Z_5 определяется из табл.4 (прилож.) $Z_5 = 2$ мм,

$$Z_4 = \frac{Z_3 + Z_5}{2} = \frac{0,6 + 2}{2} = 1,3 \text{ мм},$$

$$D_{3\min} = 1,3 + 50,72 = 52,02 \text{ мм}.$$

Для 12-го качества допуск $TD_3 = 0,4$ мм, $D_3 = 52,42_{-0,4}$.

Диаметр заготовки вала D_0 определяется из уравнения

$$Z_5 = D_0 - D_3,$$

$$Z_{5\min} = D_{0\min} - D_{3\max}.$$

Откуда

$$D_{0\min} = Z_{5\min} + D_{3\max} = 2,0 + 52,42 = 54,42 \text{ мм}.$$

Для 16-го качества допуск $TD_0 = 2,0$ мм. Следовательно, диаметр заготовки будет равен $D_0 = 56,42_{-2,0}$.

4.4. ОБОСНОВАНИЕ МАРШРУТА И РАЗМЕРНЫЙ АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА КОРПУСНОЙ ДЕТАЛИ

На рис. 4.13 изображен чертеж корпусной детали. Заготовка получена литьем в земляную форму. Точность заготовки $jT16$.

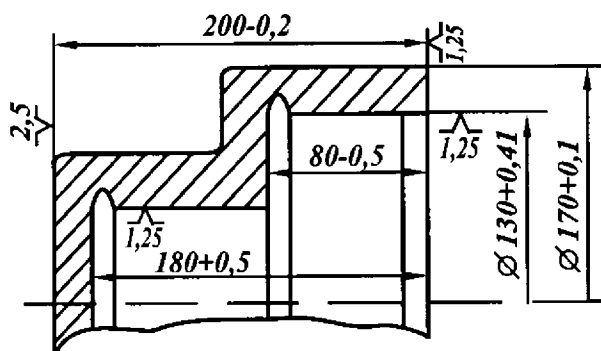


Рис. 4.13. Чертеж детали

Общее уточнение на диаметры и линейные размеры

$$\epsilon_{d=170} = \frac{2,5}{0,1} = 25;$$

$$\epsilon_{d=130} = \frac{2,5}{0,14} = 17,86;$$

$$\epsilon_{L=200} = \frac{2,9}{0,2} = 14,5.$$

Количество переходов, необходимое для получения требуемой точности:

$$K_{d=170} = 2,8 \text{ (принимаем 3)}$$

$$K_{d=130} = 2,4 \text{ (принимаем 2)}$$

$$K_{L=200} = 2,2 \text{ (принимаем 2)}$$

Разность квалитетов

$$n_{\text{кв } d=170} = jT_{\text{заг}} - jT_{\text{дет}} = 16 - 9 = 7$$

$$n_{\text{кв } d=130} = jT_{\text{заг}} - jT_{\text{дет}} = 16 - 10 = 6$$

$$n_{\text{кв } L=200} = jT_{\text{заг}} - jT_{\text{дет}} = 16 - 11 = 5.$$

Разность квалитетов распределяем по закону прогрессивного убывания

$$\Delta jT = 7 = 4 + 2 + 1 \text{ (для диаметра 170 мм);}$$

$$\Delta jT = 6 = 4 + 2 \text{ (для диаметра 130 мм);}$$

$$\Delta jT = 5 = 3 + 2 \text{ (для размера } L = 200 \text{ мм).}$$

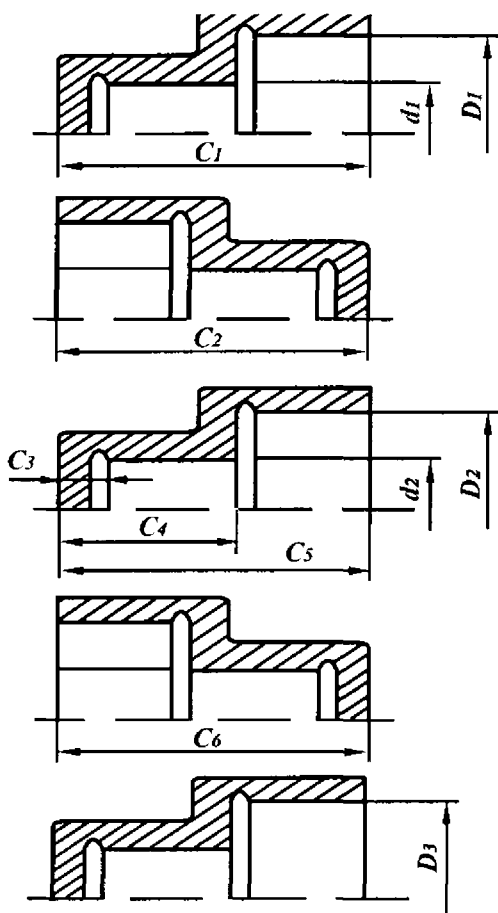


Рис. 4.14. Технологические эскизы обработки

Эскизы технологического процесса обработки детали представлены на рис. 4.14, а размерная схема – на рис. 4.15.

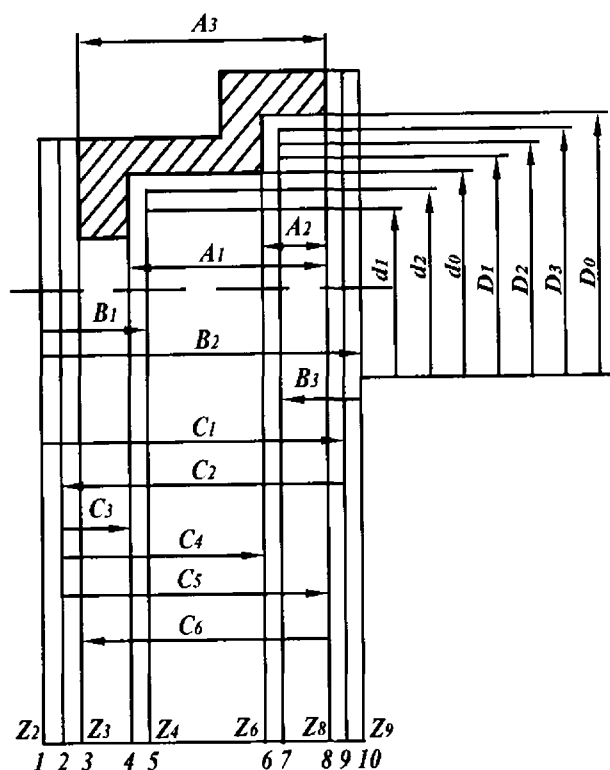
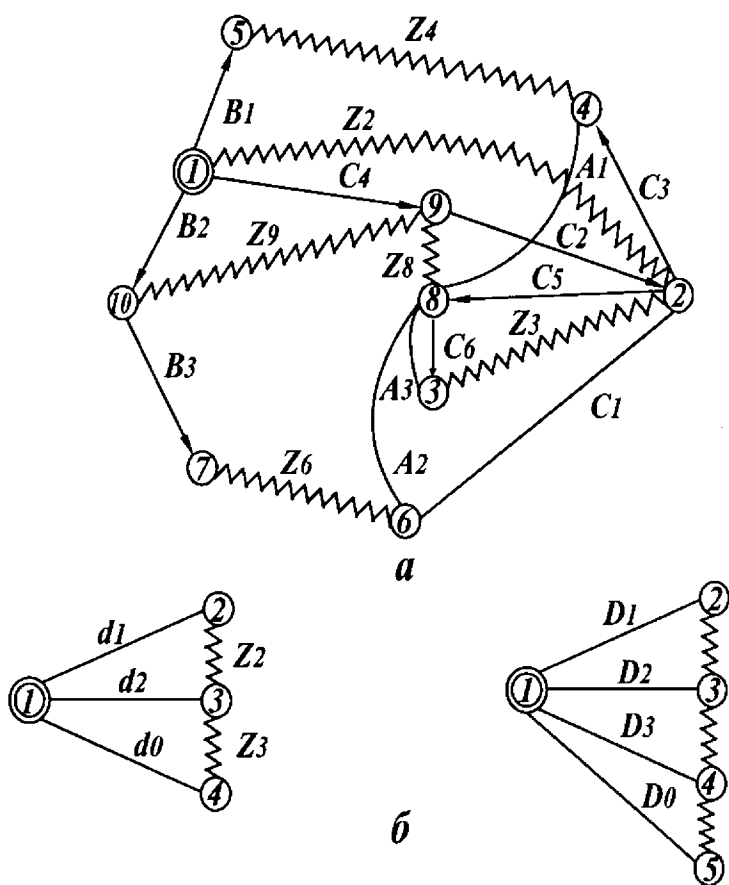


Рис. 4.15. Размерная схема



Графы размерных связей линейных размеров (в направлении оси детали) и диаметральных размеров изображены на рис. 4.16.

В качестве корня дерева выбрана вершина (поверхность) 1, к которой на размерной схеме не подходит ни одна стрелка. Выходящие из нее размеры B_1, C_1, B_2 направлены к вершинам 10, 9 и 5. Каждый замкнутый контур совмещенного графа размерных связей образует размерную цепь, у которой конструкторские размеры и припуски являются замыкающими звеньями.

Рис. 4.16. Графы размерных связей. Линейных (а) и диаметральных (б) связей

Уравнения для расчета технологических размерных цепей, выявленных из замкнутых контуров объединенного графа, приведены в табл.4.3.

Т а б л и ц а 4.3

№ п/п	Расчетные уравнения	Исходные уравнения	Определяемый параметр
1	$-A_3 + C_6 = 0$	$A_3 = C_6$	C_6
2	$-Z_3 + C_5 + C_2 = 0$	$Z_3 = C_6 - C_5$	C_5
3	$-Z_8 - C_5 + C_2 = 0$	$Z_8 = C_2 - C_5$	C_2
4	$-Z_2 + C_1 - C_2 = 0$	$Z_2 = C_1 - C_2$	C_1
5	$-Z_9 - C_1 + B_2 = 0$	$Z_9 = B_1 - C_1$	B_2
6	$-A_2 - C_4 + C_5 = 0$	$A_2 = C_5 - C_4$	C_4
7	$-Z_6 - C_4 + C_2 - C_1 + B_2 - B_3 = 0$	$Z_6 = C_2 - C_4 - C_1 + B_2 - B_3 = 0$	B_3
8	$-A_1 - C_3 + C_5 = 0$	$A_1 = C_5 - C_3 = 0$	C_3
9	$-Z_4 - C_3 + C_2 - C_1 + B_1 = 0$	$Z_4 = C_2 - C_3 - C_1 + B_1 = 0$	B_1

В табл.4.4 приведены расчетные и исходные уравнения для расчета диаметральных технологических размеров корпусной детали.

Т а б л и ц а 4.4

№ п/п	Расчетные уравнения	Исходные уравнения	Определяемый параметр
1	$-Z_3 + d_2 + d_0 = 0$	$Z_3 = d_0 - d_2$	d_2
2	$-Z_2 - d_1 + d_2 = 0$	$Z_2 = d_2 - d_1$	d_1
3	$-Z_4 - D_3 + D_0 = 0$	$Z_4 = D_0 - D_3$	D_3
4	$-Z_3 - D_2 + D_3 = 0$	$Z_3 = D_3 - D_2$	D_2
5	$-Z_2 - D_1 + D_2 = 0$	$Z_2 = D_2 - D_1$	D_1

Г Л А В А 5

КАЧЕСТВО ОБРАБАТЫВАЕМОЙ ПОВЕРХНОСТИ

5.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ФОРМИРОВАНИИ И СТРОЕНИИ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ДЕТАЛЕЙ

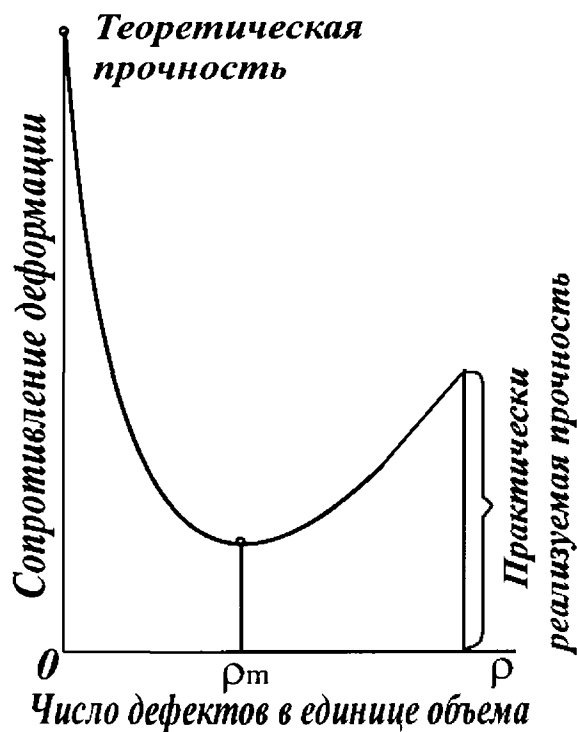
Поверхность детали включает в себя граничный слой, соприкасающийся с внешней средой, за которым залегает слой металла, существенно отличающийся от основной части материала своим строением, физико-механическими и химическими свойствами. Каждый атом, расположенный внутри металла, со всех сторон подвергается воздействию силового поля окружающих его атомов и находится в состоянии подвижного устойчивого равновесия. Атомы, расположенные на граничном слое поверхности, имеют связь только с нижележащими атомами и находятся в неуравновешенном неустойчивом состоянии.

Граничный слой толщиной порядка $10^{-6} - 10^{-7}$ мм обладает большим запасом свободной поверхностной энергии. Повышенная активность атомов, находящихся на поверхности твердых тел, способствует адсорбции элементов из окружающей среды. Толщина адсорбированного слоя соответствует примерно толщине одной молекулы жирных кислот, равной $0,002 - 0,004$ мкм ($20 - 40 \text{ \AA}$) (1 \AA ангстрем равен 10^{-10} м или $0,0001$ мкм).

Адсорбированные слои поверхностно-активных веществ оказывают значительное влияние на процесс пластической деформации и прочность металла (эффект Ребиндера). Адсорбция снижает поверхностное натяжение и энергию поверхностных атомов, облегчает развитие деформации. На поверхности деталей обнаруживаются следы различных окислов Fe_2O_3 , Fe_3O_4 , FeO . Толщина адсорбированных

слоев на деталях составляет в стали – $10 - 20 \text{ \AA}$, в цинке – $5 - 6 \text{ \AA}$, в алюминии – $100 - 150 \text{ \AA}$.

Ниже граничного слоя, покрытого пленкой водяных паров, масел и окислов, располагается сильно деформированный и упрочненный слой металла. Пластическая деформация поликристаллов этого слоя вызывает появление кристаллитных напряжений третьего рода.



Деформационное упрочнение (наклеп) металла после механической обработки основано на увеличении плотности дислокаций. Дефекты решетки, с одной стороны, способствуя образованию дислокаций, ослабляют прочность кристаллов, а с другой стороны, осуществляя препятствие свободному перемещению дислокаций, упрочняют их. Некоторая плотность дислокаций ρ_m соответствует минимальному сопротивлению кристаллов деформациям (рис. 5.1). Уменьшение ρ по сравнению с ρ_m приводит к повышению прочности, приближая структуру кристалла к идеальной. Увеличение числа дефектов в единице объема по сравнению с ρ_m также

Рис.5.1. Зависимость сопротивления деформации от числа дефектов

вызывает увеличение прочности за счет увеличения препятствий перемещению дислокаций. Практические методы упрочнения (наклеп, легирование, термообработка) соответствуют правой пологой ветви кривой (рис. 5.1). Кристаллы, обладающие почти идеальной внутренней структурой (так называемые «усы») имеют предел прочности железа – 13360 МПа, меди – 3000 МПа, цинка – 2250 МПа., в то же время в обычном состоянии перечисленные металлы имеют пределы прочности : 300 МПа, 260 МПа, 180 МПа соответственно.

Пластическая деформация металла, сопровождающаяся деформационным упрочнением в связи с увеличением плотности дислокаций и наличием напряжений второго и третьего рода, приводит металл в структурно неустойчивое, метастабильное состояние.

В этих условиях в металле начинают возникать релаксационные процессы, возвращающие металл в более устойчивое состояние.

Скорость протекания релаксационных процессов (разупрочнение) зависит от температуры нагрева металла и степени его упрочнения. Очевидно, чем сильнее упрочнен металл, т. е. чем больше он отдален от равновесного состояния, тем быстрее будет протекать разупрочнение. Степень разупрочнения (отдыха) повышается: при возрастании температуры, при увеличении продолжительности нагрева, при увеличении напряжений, стимулирующих протекание отдыха.

При обработке заготовок под воздействием сил поверхностные слои подвергаются пластической деформации, которая сопровождается упрочнением (наклепом). Интенсивность и глубина наклепа возрастают с увеличением сил резания и продолжительности их воздействия.

Установлено, что при точении наклеп поверхностного слоя возрастает с увеличением подачи, глубины резания и радиуса округления режущего лезвия [18].

Детали соприкасаются между собой поверхностями. Износ детали начинается с поверхности. Поэтому важно знать, каковы свойства поверхности реальной детали, какая высота шероховатости. Если посмотреть на поверхность гильзы в микроскоп, увеличивающий ее в 1000 раз, то зеркальная поверхность гильзы уже не будет казаться гладкой. Мы увидим на ней следы обработки. Дело в том, что шероховатости поверхности при самых тонких методах обработки не исчезают, а только становятся настолько малыми, что человеческий глаз без помощи микроскопа не может их обнаружить.

5.2. СТАНДАРТИЗАЦИЯ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ

В зависимости от условий работы деталей машин требуется назначать различную шероховатость поверхности. На одной и той же детали отдельные поверхности имеют различную шероховатость.

Почему поверхности детали имеют различную шероховатость? Не лучше ли было бы все поверхности изготавливать как можно чище? Этого не делают потому, что для получения более гладкой поверхности резко возрастают затраты труда.

Установлено [27], что затраты труда деталей, изготовленных по 4-му качеству точности с высотой неровностей $Rz = 0,016$ мкм в 4 – 5 раз выше в сравнении с деталями, изготовленными по 7-му качеству точности с высотой шероховатости $Rz = 0,16$ мкм.

Для получения 7-го качества точности достаточно одного чистового прохода. Чистовая обработка валов 4-го качества точности достигается в 3 – 4 прохода. Трудоемкость при этом, естественно, возрастает. Детали 4-го качества точности сначала обрабатываются резцом, а затем шлифуются.

Таким образом, не следует стремиться получать высокую точность и шероховатость, если этого не требуют эксплуатационные условия работы машины.

При конструировании машин конструктор должен получать шероховатость поверхности в строгом соответствии с точностью изготовления деталей [18]. Например, при диаметре сопряженных деталей выше 50 мм рекомендуется высоту шероховатости Rz назначать с учетом допуска на изготовление T (мкм).

$$Rz = (0,10 \div 0,15)T.$$

При диаметре сопряженных деталей от 18 до 50 мм

$$Rz = (0,15 \div 0,20)T.$$

При диаметре сопряженных деталей меньше 18 мм

$$Rz = (0,20 \div 0,25)T.$$

Согласно ГОСТу 2789 – 73 параметры шероховатости выбираются из следующей номенклатуры:

Ra – среднее арифметическое отклонение профиля;

Rz – высота неровностей профиля по десяти точкам;

R_{\max} – наибольшая высота неровностей профиля;

S_m – средний шаг неровностей по средней линии;

S – средний шаг неровностей по вершинам;

t_p – относительная опорная длина профиля, где p – значение уровня сечения профиля.

ГОСТ 2789-73 разбивает получаемую во всех отраслях машиностроения шероховатость на 14 классов. Классы шероховатости от 6-го

до 14-го разбиты каждый дополнительно на 3 разряда. На рис.5.2 представлена профилограмма поверхности.

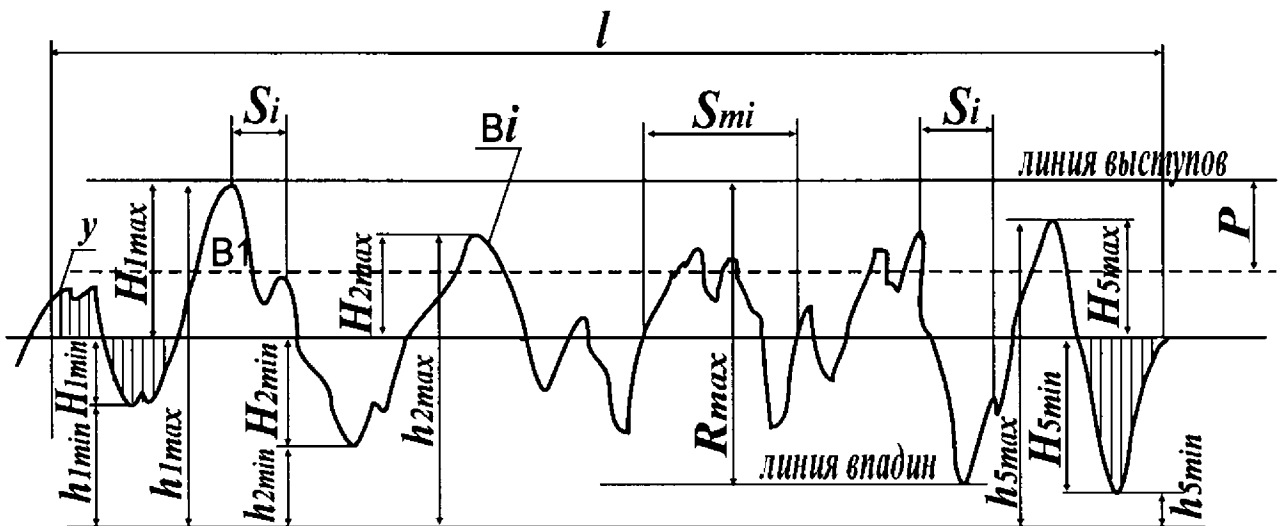


Рис. 5.2. Профилограмма поверхности

Сумма средних арифметических отклонений точек пяти наибольших максимумов профиля в пределах базовой длины равна

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

или

$$R_z = \frac{1}{5} \left(\sum_{i=1}^5 h_{i \max} - \sum_{i=1}^5 h_{i \min} \right).$$

Среднее арифметическое отклонение профиля в пределах базовой длины определяется из выражения $R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i|$.

Относительная опорная длина профиля равна отношению опорной длины профиля $\sum_{i=1}^n b_i$ к базовой длине l т. е. $t_p = \frac{1}{l} \sum_{i=1}^n b_i$,

где p — характеризует уровень сечения профиля, который равен расстоянию между линией выступов профиля профилограммы и линией, пересекающей профиль в исследуемом сечении.

На рис. 5.3 представлено рекомендуемое ГОСТом 2.309 –73 обозначение шероховатости поверхности.

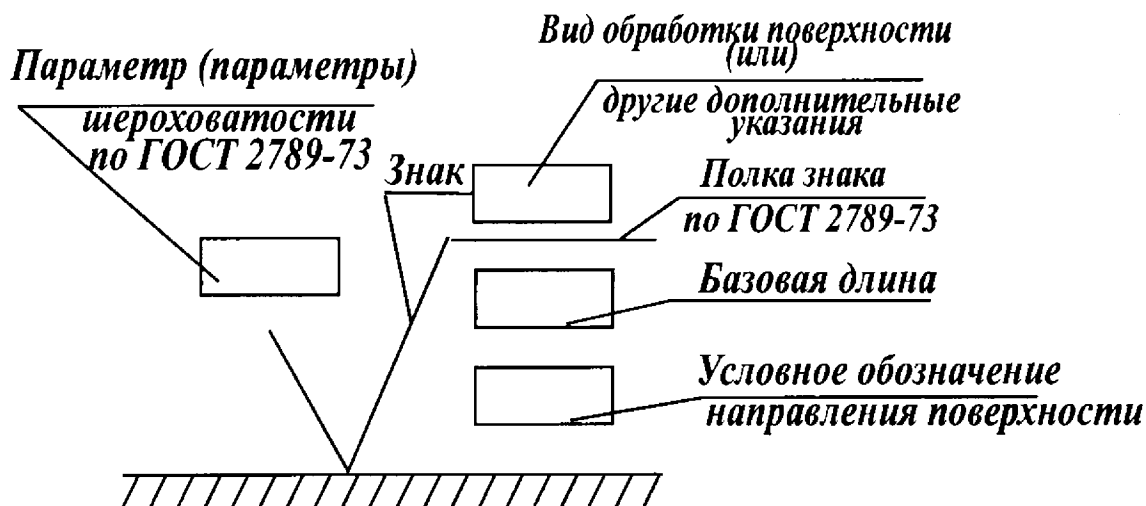


Рис. 5.3. Рекомендуемые ГОСТом 2.309–73 обозначения шероховатости поверхности

В тех случаях, когда конструктор не указывает метод обработки поверхности, шероховатость поверхности обозначается знаком 1 (рис.5.4, б). Если конструктор указывает метод обработки, то шероховатость поверхности обозначается знаком 2 (рис. 5.4, б).

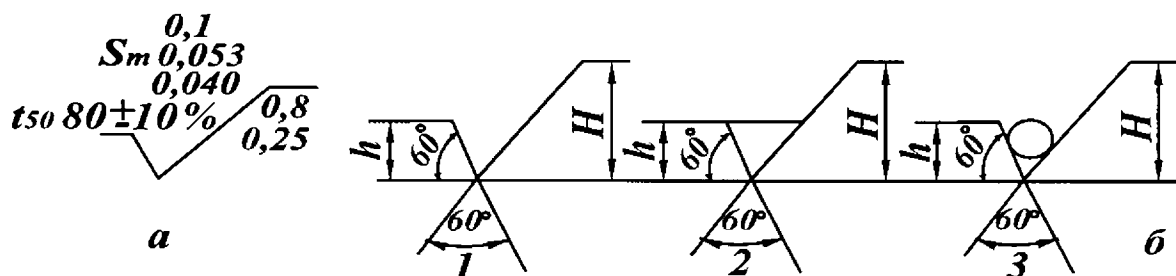


Рис. 5.4. Полная запись шероховатости поверхности (а) и условные знаки обозначения шероховатости (б) ($H=(1,5-3)h$, h – равна высоте цифр размерных чисел на чертеже): 1) без указания метода обработки; 2) с указанием метода обработки; 3) черновые поверхности

Черные поверхности обозначаются знаком 3 (рис. 5.4, б). При обозначении шероховатости поверхности указываются пределы колебаний, например, $R_{z_{0,032}}^{0,080}$; $R_{\max_{0,32}}^{0,80}$; $t_{50_{70}}^{50}$.

В последнем примере $t_{50_{70}}$ указывается относительная опорная длина профиля в пределах $t_p = 70\%$ при уровне сечения профиля $p = 50\%$.

При указании двух или более параметров шероховатости поверхности следует указывать сначала высоту неровностей, затем шаг неровностей профиля, а затем опорную длину профиля.

Например, полная запись шероховатости поверхности показана на (рис. 5.4, а).

Условные обозначения направления неровностей показаны в табл. 5.1.

Т а б л и ц а 5.1

Схематическое изображение неровностей		Обозначение
	параллельная	$\sqrt{=}$
	перпендикулярная	$\sqrt{\perp}$
	перекрещивающаяся	$\sqrt{\times}$
	произвольная	\sqrt{M}
	круговая	\sqrt{C}
	радиальная	\sqrt{R}

По ГОСТу 2789 – 73 рекомендуется оценивать высоту неровностей профиля Rz , изменяющуюся в пределах $320 \div 10$ мкм (с 1 по 5 классов шероховатости поверхности) и от 0,10 до 0,025 мкм (с 13 по 14 классов шероховатости).

Среднее арифметическое значение профиля Ra применяется для оценки шероховатости, изменяющейся в пределах от 2,5 до 0,020 мкм (в интервале 6 – 12 классов шероховатости).

Оценка соответствия фактической шероховатости поверхности, заданной на чертеже, производится с помощью применения специальных приборов.

5.3. ПРИБОРЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ

Оценивая шероховатость поверхности степенью или на глаз, мы получаем крайне субъективные результаты оценки. Но если производить сопоставление двух шероховатых поверхностей, можно сравнительно точно определить, какая из двух поверхностей имеет более высокую шероховатость.

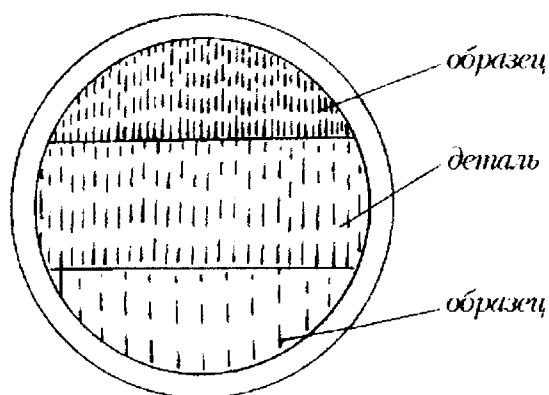


Рис. 5.5. Зоны сравнения шероховатости поверхности с эталонами

Для поверхностей с более высоким классом шероховатости человеческий глаз не в состоянии дать достоверную оценку шероховатости. Для более точной оценки шероховатости применяют микроскопы сравнения. В поле зрения прибора видна шероховатость детали и двух образцов, увеличенная в 10 – 15 раз (рис.5.5).

Оптическая схема микроскопа сравнения показана на рис. 5.6. На барабаны 2 устанавливается по шесть образцов разной шероховатости. Вращением барабана устанавливают образцы таким образом, чтобы с одной стороны был образец с более грубой шероховатостью поверхности, чем поверхность детали, а с другой – образец с более чистой поверхностью.

Сопоставляя шероховатость детали с эталоном чистоты, можно более уверенно сказать, что шероховатость поверхности

Следует заметить, что глазомерную оценку шероховатости сравнением с эталоном чистоты можно производить лишь для поверхностей не менее 6–7 классов чистоты.

Для поверхностей с более высоким классом шероховатости человеческий глаз не в состоянии дать достоверную оценку шероховатости.

Для более точной оценки шероховатости применяют микроскопы сравнения. В поле зрения прибора

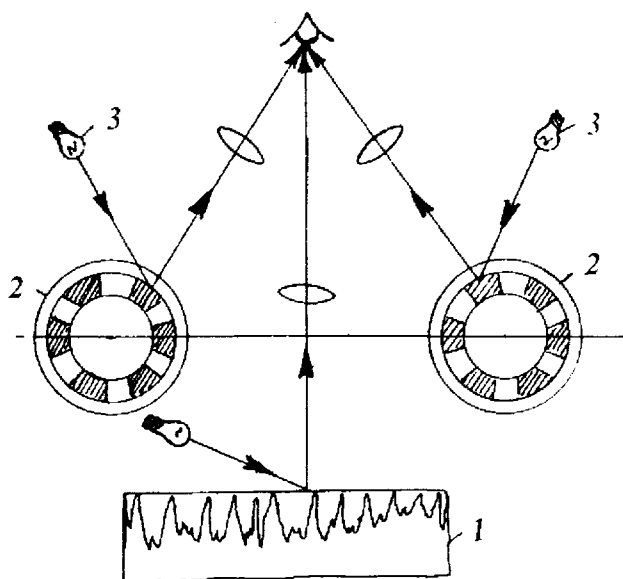


Рис. 5.6. Схема микроскопа сравнения шероховатостей

детали находится в пределах, установленных эталоном чистоты. Этот прибор применяется для оценки высоты шероховатости поверхности от 8-го до 11-го классов, т. е. от 0,63 мкм до 0,04 мкм. Микроскоп сравнения не дает количественной оценки высоты неровностей.

Для количественной оценки высоты неровностей существуют приборы, основанные на принципе ощупывания алмазной иглой поверхности и на принципе излома светового луча. Сущность методов измерения шероховатости поверхности можно рассмотреть на следующих примерах.

В 1929 году русский ученый академик В.П. Линник предложил прибор для оценки шероховатости поверхности, основанный на методе так называемого светового сечения. Если луч света направить под определенным углом на обработанную поверхность, а с противоположной стороны под таким же углом производить наблюдения за поверхностью, то по величине излома светового луча можно судить о величине шероховатости поверхности. Этот прибор называется двойным микроскопом академика Линника. Он дает увеличение до 318 раз (рис. 5.7).

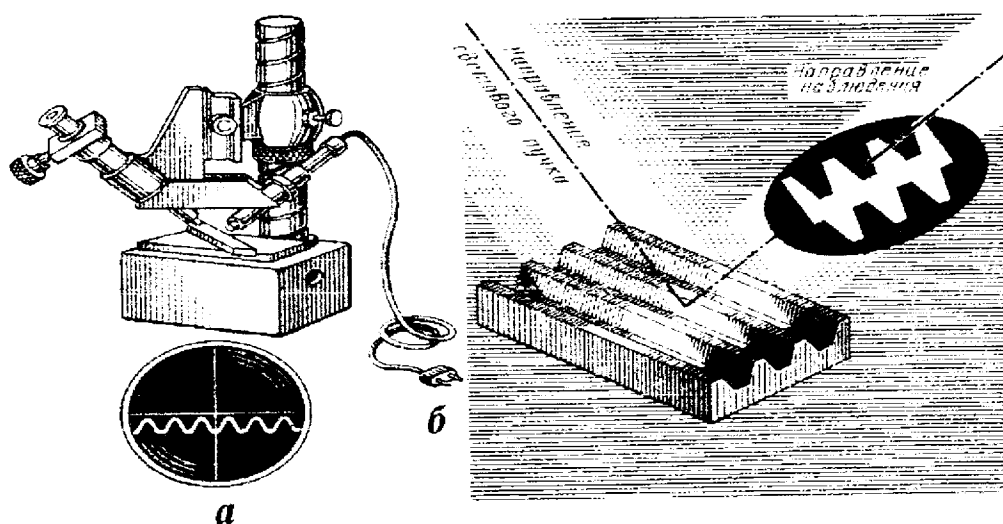


Рис. 5.7. Двойной микроскоп акад. В.П. Линника

Приборы, работающие по методу ощупывания, называются профиллометрами или профиллографами. Алмазная иголочка с малым радиусом закругления вершины до 12 микрон, перемещаясь по детали, копирует имеющиеся на поверхности неровности. При перемещении иглы, находящейся в электрическом поле постоянного магнита в соленоиде, возникает электрический ток, величина которого пропор-

циональна величине подъема иглы. Ток через усилитель передается регистрирующему прибору, который показывает величину шероховатости.

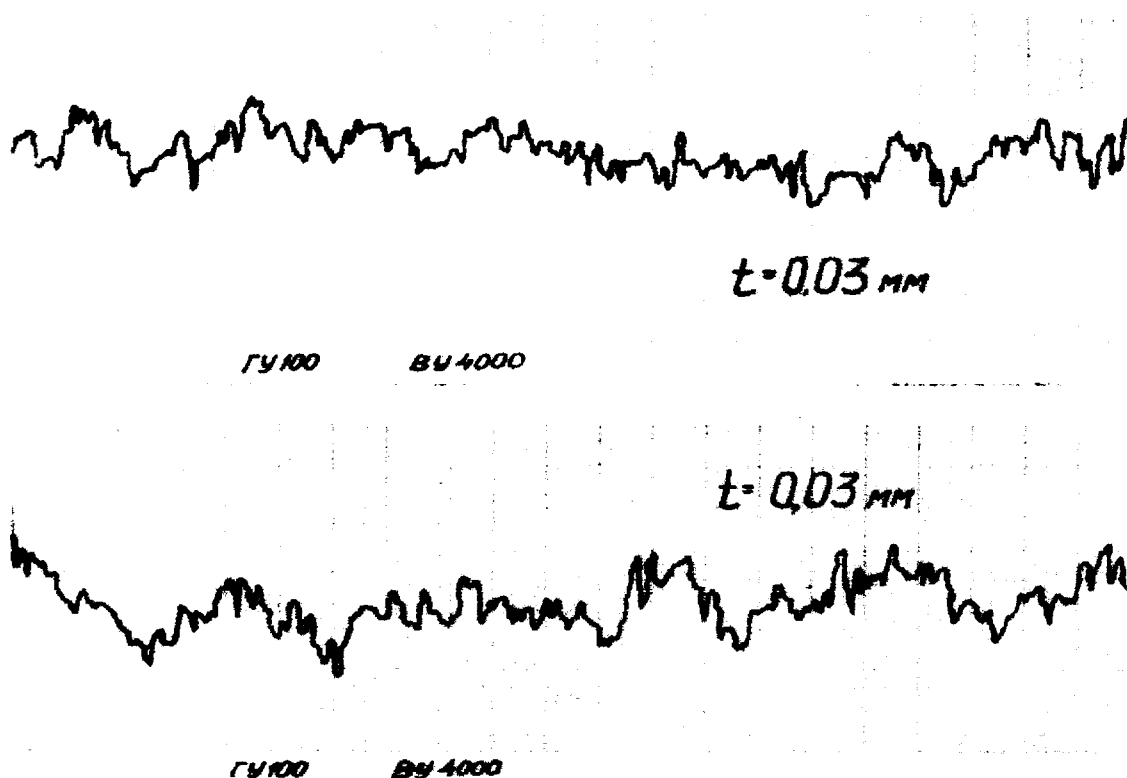


Рис. 5.8. Профиллограмма шероховатости поверхности после шлифования стали 7Х12ВМ, кругом 24А16СМ26К на режиме $V_{кр} = 35$ м/с, $V_{ст} = 10$ м/мин, $S_{\epsilon} = 0$ без СОЖ $t = 0,03$ мм

Профиллографы позволяют записать профиллограммы поверхности с увеличением, достигающим 40000 раз. На рис. 5.8 представлена профиллограмма поверхности.

5.4. ПРИЧИНЫ ОБРАЗОВАНИЯ ШЕРОХОВАТОСТЕЙ НА ОБРАБОТАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Шероховатость – это следы, оставленные режущим инструментом на обработанной поверхности.

Наиболее наглядно образование шероховатости можно показать на примере обработки плиты резцом на строгальном станке.

На строгальном станке резец совершает движение вдоль плиты, срезает слой обрабатываемого материала заданной глубины (рис. 5.9). После каждого прохода вдоль плиты резец, срезав узкую полос-

ку металла, возвращается обратно. В конце этого холостого хода резец перемещается поперек плиты на величину подачи S .

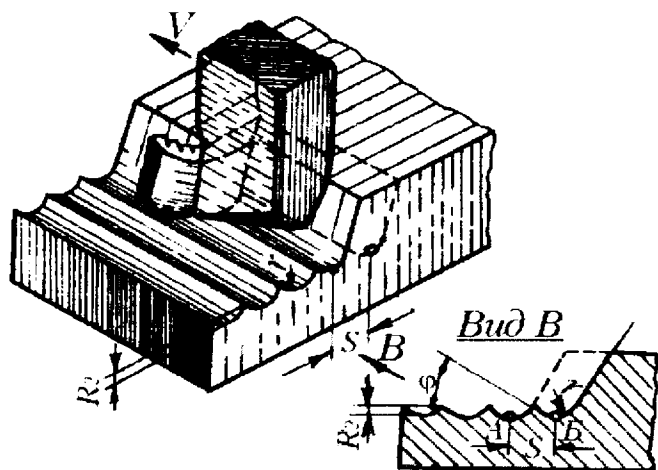


Рис. 5.9. Формирование шероховатости на строгальном станке

Аналогичный профиль сечения обработанной поверхности формируется при обработке на токарном станке.

Высота гребешков на обработанной поверхности зависит от подачи S , радиуса закругления вершины резца и вспомогательного угла в плане φ . Чем меньше подача и больше радиус закругления вершины резца, тем меньше будет высота шероховатости.

Высоту шероховатости H можно найти из выражения

$$H = \rho - \frac{\sqrt{4\rho^2 - S^2}}{2},$$

где ρ – радиус закругления вершины резца, в мм; S – подача, мм/об.

Если вспомогательную режущую кромку расположить параллельно траектории подачи, а ее длину сделать больше величины подачи, то никаких шероховатостей на обработанной поверхности не должно быть. Такой метод применяется на развертках, торцевых фреззах и многих других инструментах. Однако идеально гладкой поверхности при этом не получается. При самых благоприятных условиях при развертывании можно получить шероховатость поверхности не выше 9-го класса по ГОСТу 2789 – 73. Следует заметить, что на высоту шероховатости поверхности, кроме геометрических параметров, оказывает влияние целый ряд других факторов.

Например, нарост, образовавшийся на передней поверхности, оказывает существенное влияние на шероховатость поверхности. В процессе обработки геометрическая форма нароста изменяется. Установлено [23], что чем больше величина нароста, тем больше высота неровностей. Нарост, имея нестабильную и неровную кромку, оставляет на обработанной поверхности глубокие риски (рис. 5.10).

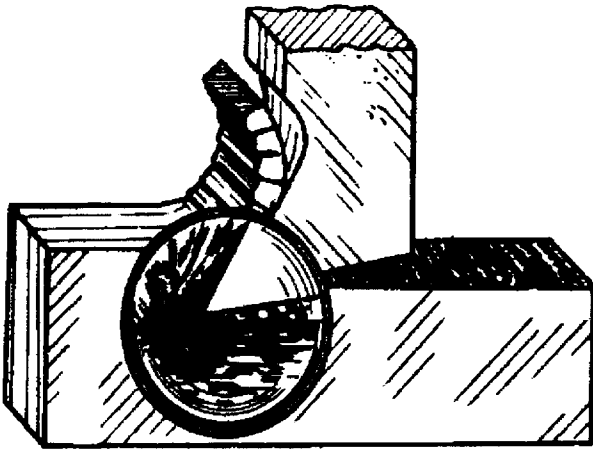


Рис. 5.10. Обработка материала с наростом на резце

Существенное влияние на высоту шероховатости оказывают режимы обработки и физико-механические свойства обрабатываемого материала. Например, при обработке пластичных материалов, к которым относятся сталь, алюминиевые сплавы и др., существенное влияние на шероховатость поверхности оказывает скорость резания.

Например, при обработке стали 45 с продольной подачей 0,2 мм/об в интервале увеличения

скорости резания от 5 до 25 м/мин, высота шероховатости поверхности возрастает от $Rz = 25$ мкм до $Rz = 40$ мкм. В интервале увеличения скорости резания от 25 м/мин до 90 м/мин высота шероховатости обработанной поверхности уменьшается от $Rz = 40$ мкм до $Rz = 20$ мкм.

Ухудшение шероховатости связано с увеличением нароста. Образование нароста зависит прежде всего от температуры резания.

Для машиноподелочных сталей максимальная величина нароста возникает при температуре 200°C . С повышением температуры вероятность появления нароста уменьшается и при 600°C нарост полностью исчезает. Для улучшения частоты поверхности следует увеличивать скорость резания при одновременном уменьшении продольной подачи. Однако известны случаи, когда чрезмерное уменьшение продольной подачи может вызвать появление матовой поверхности. При внимательном рассмотрении этой поверхности можно увидеть задиры, указывающие на то, что процесс обработки протекал в условиях наростообразования. С уменьшением подачи температура в зоне резания уменьшается, а на режущей кромке резца появляется нарост. Для устранения наростообразования надо увеличить скорость резания.

При обработке хрупких материалов, например, чугуна, нарост не образуется. Скалывание стружки здесь происходит по границам зерен. Чем меньше скорость резания, тем больше возможность отделения стружки надлома (рис. 5.11).

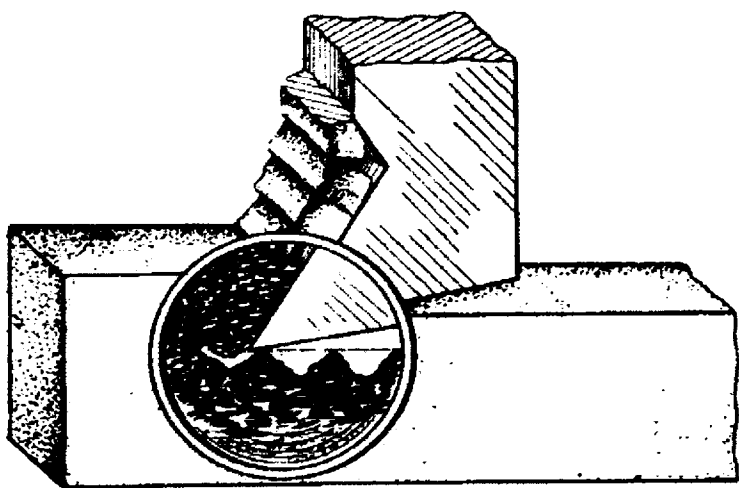


Рис. 5.11. Обработка хрупких материалов

При высоких скоростях резания отделение стружки по границам зерен не успевает произойти. Зерна не вырываются, а подрезаются.

При обработке цветных металлов (медь, алюминий) для устранения нароста рекомендуется производить обработку на скоростях резания 1500 – 2000 м/мин.

5.5. ПРИЧИНЫ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ШЛИФОВОЧНЫХ ТРЕЩИН

На обрабатываемых поверхностях деталей, изготовленных из легированных сталей, твердых и жаропрочных сплавов, часто после шлифования появляются трещины. Трещины обычно распространяются в области стыка встречных пластически деформированных зон металла. Наиболее мягкие фазы деформируются больше, причем, деформация имеет сдвиговый характер. Сдвиги фаз распространяются по плоскостям, имеющим наименьшее сопротивление деформации.

Характер образующихся трещин в плоскости обработки подтверждает наличие эффекта сдвига в направлении, перпендикулярном к следам обработки. Явления сдвига свидетельствуют о том, что разрушение поверхности происходит не в период ее нагрева, а в период охлаждения, т.е. после выхода из зоны резания.

Кроме того, под действием высоких температур, вызывающих оплавление гребешков микронеровностей на поверхности, возникают трещины металлургического (усадочного) характера (рис. 5.12).

В структуре обрабатываемого материала содержится множество опасных в различной степени дефектов. При некоторых условиях нагружения любой из этих дефектов, подобно надрезу, служит источником концентрации напряжений и местом зарождения трещины. Наиболее опасными источниками зарождения трещин являются включения в виде сплошных межзеренных пленок.



Рис. 5.12. Трещины усадочного характера

находящиеся в состоянии повышенной энергии, термодинамически менее устойчивы, чем соседние к ним области того же металла с меньшей напряженностью.

В большинстве своем трещины имеют замкнутый вид и располагаются по границам контура наследственных аустенитных зерен. На рис.5.13 представлена шлифовочная трещина, проходящая по границе аустенитного зерна. Внутри аустенитного зерна находятся измельченные зерна, сформированные при термической обработке.



Рис. 5.13. Шлифовочные трещины

Разрушение металла по границам зерен связано с тем, что внутри каждого наследственного аустенитного зерна содержится большое количество более мелких зерен, имеющих различную ориентацию по отношению к контуру наследственного зерна. Произвольно ориентированные зерна фаз, сформировавшихся при закалке, в силу анизотропии при нагревании расширяются, а при охлаждении сокращаются по-разному. Это оказывает механическое воздействие на каркас-оболочку наследственных зерен, вызывая разрушения по границам зерен.

Высокие температуры в зоне резания вызывают ослабление связей на границах фаз, а разность коэффициентов линейного и объемного расширения материалов фаз и каркаса увеличивает сдвиговые эффекты в направлении, перпендикулярном траектории перемещения режущих зерен. На границах зерен величина необходимого напряжения для разрушения значительно меньше, чем сопротивление отрыву внутри самого зерна.

В цементируемых сталях ослабленными участками является цементная сетка, в жаропрочных сплавах – интерметаллидная фаза на границах кристаллов твердого раствора, в металлокерамических сплавах – поры или иные металлические включения, в высокохромистых сталях охрупчивание придает карбидная строчечность.

На рис. 5.14 представлен внешний вид структуры сплава ХН80ТБ10. По границам аустенитных зерен выделена интерметаллидная α' фаза.

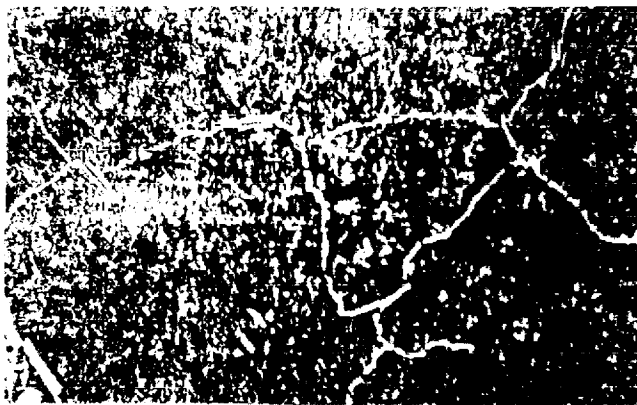


Рис. 5.14. Структура, на границах зерен которой выделена интерметаллидная α' фаза

Предрасположенность металлов к трещинообразованию зависит от состояния структуры, сформировавшейся при литье, ковке и термической обработке. Например, карбидную строчечность в высокохромистых сталях можно устранить дополнительным лигированием молибденом, ванадием, кобальтом, ниобием и другими элементами при литье.

Цементную сетку устраняют путем подбора режимов термической обработки. Структуру жаро-

прочного сплава ХН80ТБ10 в виде твердого раствора с дисперсным выделением интерметаллидной α' фазы можно получить путем ужесточения интервала колебаний температур при закалке до $1220^{\circ}\pm 5^{\circ}$ и обеспечения равномерного температурного поля по всему поду печи.

Твердость поверхности повышает чувствительность ее к появлению трещин. Например, при шлифовании цементируемой стали 12Х2Н4А с исходной твердостью HRC 58 – 60 трещины появляются редко. С повышением твердости до HRC 65 – 66 вероятность появления трещин резко увеличивается.

Приведенные данные показывают, что технологическая наследственность материалов имеет прямое отношение к трещинообразованию при шлифовании. Поэтому проблему устранения шлифовочных трещин надо решать на протяжении всего хода технологического процесса.

5.6. ВЛИЯНИЕ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ПЛАВКИ НА ВОЗНИКНОВЕНИЕ ШЛИФОВОЧНЫХ ТРЕЩИН

На опыте машиностроительных заводов известно, что, несмотря на предпринимаемые меры по уменьшению теплонапряженности процесса (например, путем применения прерывистых кругов или импрегнирования), на деталях из хромоникелевых сталей после шлифования в ряде случаев появляются трещины. Их появление носит эпизодический характер и, как установлено [32], не связано с каким-либо отклонением от принятой технологии механической и термической обработки.

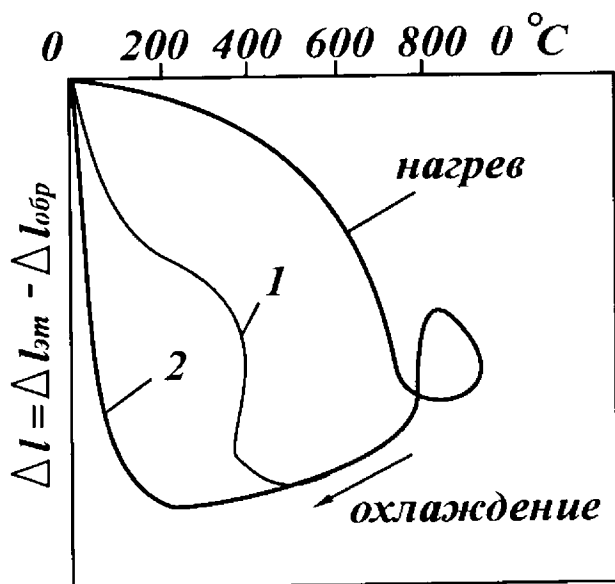


Рис.5.15. Дилатометрические кривые различных плавок стали 12Х2Н4А (по данным В.А. Бахвалова)

Изучение этого аспекта [32] показало, что появление шлифовочных дефектов зависит от индивидуальных особенностей плавок сталей.

Было установлено [33], что в зависимости от химического состава плавок стали 12Х2Н4А по характеру изменения дилатометрических кривых можно разделить на две группы (рис. 5.15).

Для первой группы плавок характерен частичный распад аустенита в области высоких температур (350 – 400°С) (кривая 1), для второй группы – распад аустенита происходит при низких

температурах (70 – 100°С) (кривая 2). На деталях из плавок первой группы шлифовочных трещин не возникает, а на деталях из плавок второй группы шлифовочные трещины появляются очень часто. Попробуем объяснить происходящие процессы.

Механические свойства хромоникелевых сталей до 600°C почти не изменяются. Дальнейшее увеличение температуры приводит к резкому увеличению пластичности и уменьшению предела текучести материала. В зоне резания металл разогревается до температур, превышающих критические точки структурных превращений. Уменьшение объема металла при охлаждении вызывает появление растягивающих напряжений. Наряду с этим, для плавок сталей, имеющих на диламетрических кривых ступеньку (рис. 5.15) в интервале изменения температур $350 - 400^{\circ}\text{C}$., происходит распад аустенита, сопровождающийся увеличением объема. При этих условиях возникают напряжения обратного знака (сжимающие напряжения). В результате после полного охлаждения в материале возникнут небольшие растягивающие напряжения, которые не вызывают появления трещин.

В сталях, относящихся ко второй группе, распад аустенита происходит при температурах ниже 200°C . Здесь внутренние напряжения растяжения не уравниваются структурными напряжениями сжатия. По мере охлаждения они непрерывно увеличиваются и в интервале $150 - 200^{\circ}\text{C}$ достигают значений, превышающих предел прочности металла.

5.7. ВЛИЯНИЕ ПРОЦЕССА ОБРАБОТКИ НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ДЕТАЛЕЙ

При обработке металлов резанием в поверхностном слое происходит дробление, поворот и вытягивание кристаллических зерен в направлении силы резания и формирование текстуры. Пластическая деформация осуществляется путем движения волн дислокаций по плоскостям скольжения с их выходом на поверхность кристаллов и образованием соответствующих ступенек сдвига. Пластическая деформация сопровождается деформационным упрочнением (наклепом). В микроскопических объемах возникают межкристаллитные и внутрикристаллитные напряжения второго и третьего рода.

Деформационное упрочнение сопровождается изменением физических, электрических, магнитных и иных свойств металла. Уменьшается плотность металла, например, при достижении степени холодной пластической деформации, равной 90%, объем деформированного чистого железа и стали увеличивается на 5% [18]. Пластиче-

ская деформация снижает коррозионную стойкость, его магнитную проницаемость, остаточную индукцию, электропроводность и теплопроводность, повышает коэрцитивную силу и электрическое сопротивление, скорость протекания диффузионных процессов. Изменение указанных свойств металлов существенно влияет на эксплуатационные свойства деталей машин. Следовательно, при проектировании технологических процессов надо учитывать происходящие процессы в зоне резания.

Пластическая деформация сопровождается выделением в зоне резания тепла. Под действием высоких температур в металле возникают релаксационные явления разупрочнения (отдыха). Металл возвращается в более устойчивое состояние.

Скорость разупрочнения зависит от температуры нагрева металла и степени его упрочнения. Чем сильнее упрочнен металл, т. е. чем больше он удален от равновесного состояния, тем быстрее и полнее будет протекать его разупрочнение. Разупрочнение металла происходит не только после окончания пластической деформации, но и в период самой деформации. При обработке металлов в зоне резания протекают два противоположных по своим результатам процесса – упрочнение и разупрочнение. Конечное состояние поверхностного слоя металла определяется соотношением скоростей протекания процессов упрочнения и разупрочнения, которые зависят от силового и теплового факторов. Степень и глубина наклепа зависят от вида механической обработки, режима и геометрии режущего инструмента.

При обработке лезвийными инструментами (при точении, фрезеровании, сверлении) степень наклепа поверхностного слоя материала и глубина возрастают с увеличением подачи, глубины резания и радиуса округления режущего лезвия. Скорость резания проявляется через изменение теплового воздействия на металл и, соответственно, снижения степени наклепа.

При обработке закаленных сталей абразивными инструментами в зоне резания часто возникают температуры, превышающие структурные и фазовые превращения. В результате на поверхности возникают большие растягивающие напряжения, величина которых в ряде случаев превышает предел прочности материала. На шлифуемых поверхностях возникают шлифовочные дефекты: прижоги и трещины.

Прижоги – местные изменения структуры поверхностного слоя металла, образующиеся в результате возникновения в зоне резания высоких температур.

В зависимости от внешнего воздействия прижоги бывают сплошные – вся поверхность детали покрыта прижогом, пятнистые – на поверхности имеются отдельные пятна с прижогами и в виде отдельных штрихов (рис. 5.16).

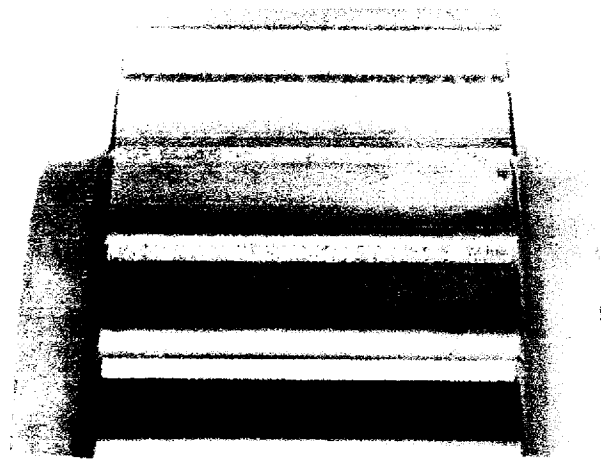


Рис.5.16. Внешний вид штриховых прижогов

По характеру изменения микроструктуры различают прижоги отпуска, представляющие структуру троостита, сорбита или троосто-мартенсита, и прижоги вторичной закалки с отпуском. В поверхностном слое вторично-закаленный слой имеет повышенную твердость и повышенное процентное содержание аустенита. Он расположен на мягкой основе отпущенного слоя, который

далее переходит в нормальную мартенситную структуру.

На рис. 5.17 представлен протравленный макрошлиф структуры поверхностного слоя плоского образца из стали 12Х2Н4А после шлифования. Белый нетравящийся слой вторичной закалки распространяется на глубину 0,01–0,02 мм. Этот слой имеет твердость 9500–10000 МПа при исходной твердости до шлифования $H_{100} = 7600–8000$ МПа. За белым слоем залегает отпущенный слой троостито-сорбитной структуры (темная зона), имею-

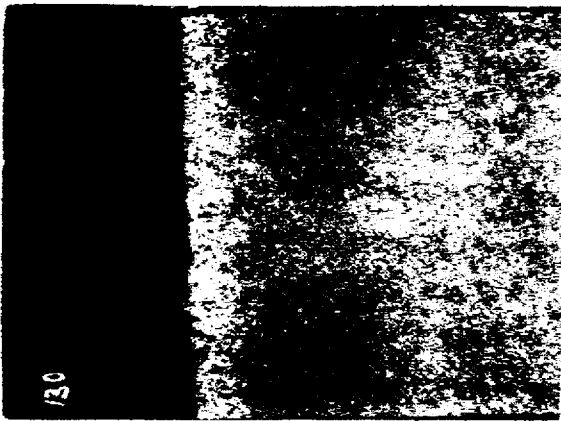


Рис.5.17. Внешний вид структуры образца из стали 12Х2Н4А после шлифования на режиме $t = 0,05$ мм, $V_d = 10$ м / мин, $V_{кр} = 30$ м / с

щий твердость $H_{100} = 4800–5000$ МПа. Разработана девяти балльная классификация прижогов по степени возрастания их концентрации [41]

$$N = \left(100 - \frac{H_{100i}}{H_{100исх}} 100 \right) \%,$$

где N – степень отпуска в процентах; H_{100i} – микротвердость отпущенной структуры материала после шлифования; $H_{100исх}$ – исходная микротвердость структуры до шлифования.

Прижог нулевого балла соответствует исходной структуре, сформированной при химико-термической обработке, но которая имеет некоторое занижение твердости по сравнению со структурой до шлифования. Например, прижог 1-го и 2-го балла по внешнему виду структуры мартенсита не отличается от исходной, но имеет также заниженную твердость.

Прижог восьмого балла соответствует степени понижения твердости на 35 – 40% по отношению к исходной.

Результаты микроструктурного анализа и измерения микротвердости по косому срезу на приборе ПМТ-3 позволили провести классификацию прижогов по баллам [41].

Т а б л и ц а 5.2

Степень концентрации прижога	Структура металла	Глубина отпущенного слоя, мкм	Микротвердость, мПа		
			основного металла	обработанной поверхности	степень понижения твердости, %
0	мартенсит	–	7600	7200	5,3%
1	мартенсит	–	7400	6650	10%
2	мартенсит	–	7000	6300	15%
3	троостит	26,2	8200	6300	20%
4	троостит	36,7	7900	6200	23%
5	троостит	44,6	8100	6300	26%
6	троостит	52,4	7900	5400	32%
7	сорбит	78,0	8000	5200	35%
8	сорбит	83,8	7200	4600	38%

Прижоги от 3-го до 6-го балла имеют трооститную структуру с различной степенью отпуска и с возрастающей глубиной дефектного слоя. Прижоги 7-го и 8-го баллов имеют сорбитную структуру.

Рассматривая изменение микроструктуры поверхности детали с различной концентрацией прижогов, можно судить приближенно о теплонапряженности процесса шлифования. Известно, что мартенсит переходит в троостит при нагревании в диапазоне изменения температур 200 – 450°C, а в сорбит – в интервале изменения температур

500 – 600°С. Следовательно, поверхность деталей, имеющих концентрацию прижогов от 3-го до 6-го баллов включительно, нагревались в интервале изменения температур 200 – 400°С, а прижоги 7-го и 8-го баллов сформировались в диапазоне изменений температур 500 – 600°С.

Зависимость температуры нагрева поверхности детали от степени концентрации прижогов определяется уравнением $\theta=75Б$ [41], где буква Б характеризует номер балла отпущенной структуры. Например, отпущенная структура 7-го балла возникает при температуре нагрева $T = 75 \cdot 7 = 525^\circ\text{C}$.

Проведенный анализ свидетельствует о том, что одной из главных причин, оказывающих влияние на физико-механическое состояние поверхностного слоя деталей, является температура, возникающая в зоне резания.

Следовательно, для управления качеством поверхностного слоя деталей необходимо разработать способ управления теплонапряженностью процесса обработки.

5.8. ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ, ПРОТЕКАЮЩИЕ В ПОВЕРХНОСТНОМ СЛОЕ ДЕТАЛЕЙ ПРИ АЛМАЗНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКЕ

В зоне контакта шлифовального круга с обрабатываемой деталью возникают температуры, иногда превышающие критические точки структурных превращений. Несмотря на кратковременность нагрева, в поверхностных слоях деталей возникают структурные и фазовые изменения. Область, в которой протекают термомеханические процессы от высоких температур, выделяемых при шлифовании, можно разделить на три характерные зоны (рис.5.18):

1. Незначительного повышения температуры перед приближающимся тепловым источником.
2. Интенсивного выделения тепла под тепловым источником.
3. Интенсивного охлаждения после прохождения теплового источника.

Поверхностные слои материала первой зоны нагреваются до температур порядка 150 – 200°С. При этих температурах структурных и фазовых превращений не происходит, но материал подвергается ответному расширению, повышается подвижность дислокаций,

способствующих разрыхлению материала. В этой зоне возникают сжимающие напряжения, которые относятся к упругопластическому типу.

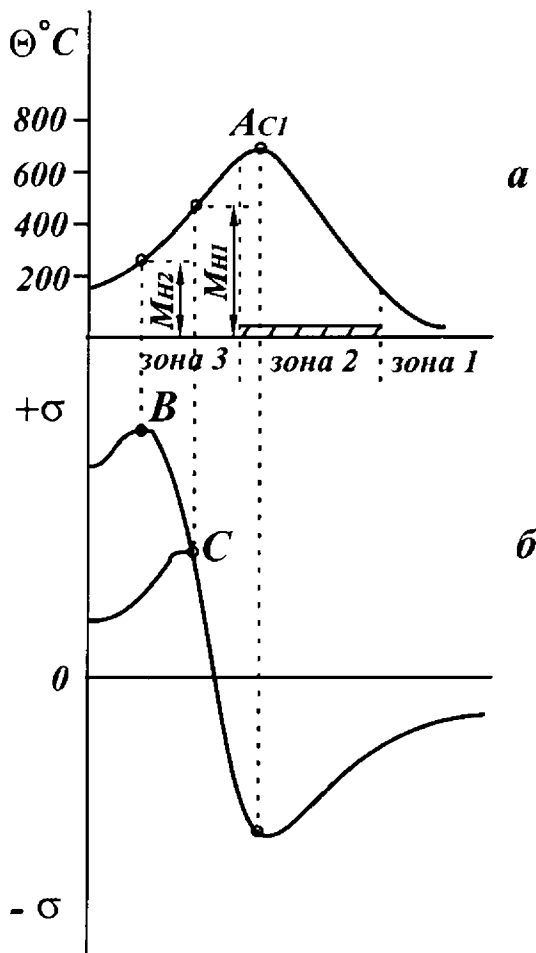


Рис. 5.18. Кинетика формирования термомеханического состояния поверхностного слоя при шлифовании:

1. Зона предварительного разогрева; 2. Зона интенсивного тепловыделения; 3. Зона интенсивного охлаждения

вающих). Последние достигают максимума при температуре, соответствующей критической точке M_H .

Дальнейшее понижение температуры сопровождается увеличением объемов и, соответственно, уменьшением напряжений за счет бездиффузионного превращения аустенита в мартенсит. На рис. 5.18 видно, что с понижением температуры, соответствующим точкам бездиффузионного $\gamma \rightarrow \alpha$ превращения от M_{H1} до M_{H2} , временные

Вторая зона подвергается силовому и термическому воздействию. От термомеханического удара материал в этой зоне подвергается не только структурным и фазовым превращениям, но и ответному расширению от высоких температур.

В интервале нагрева тонкого слоя до точки AC_1 в нем возникают напряжения сжатия. При дальнейшем увеличении температуры поверхностный слой, с одной стороны, продолжает увеличиваться в объеме, а с другой, — за счет образования структур распада мартенсита с меньшим удельным объемом стремится сжаться. Суммирование тепловых и структурных напряжений приводит к уменьшению их уровня. Величина сжимающих напряжений достигает максимума при температуре, соответствующей точке AC_1 .

В зоне 3 поверхностный слой подвергается интенсивному охлаждению, уменьшается в объеме. Глубинные слои, препятствуя этому, вызывают в верхнем слое появление напряжений обратного знака (растягивающих).

растягивающие напряжения увеличиваются от точки C_0 до B . Установлено, что на деталях из плавок, имеющих точку мартенситного превращения в пределах $300 - 400^\circ\text{C}$, шлифовальные трещины не возникают и, наоборот, стали, имеющие точку мартенситного превращения в области $80 - 120^\circ\text{C}$, чрезмерно предрасположены к шлифовочным трещинам.

В связи с изложенным возникает необходимость всестороннего изучения температурного поля как в изделии, так и в инструменте на основе фундаментальных законов природы и современного математического аппарата.

5.8.1. Постановка тепловых задач

В реальных процессах обработки условия на границах детали с инструментом настолько сложны, что описать их на языке математики без схематизации не представляется возможным. При схематизации выделяются наиболее существенные параметры и исключаются из рассмотрения второстепенные.

В качестве примера рассмотрим модель плоского шлифования периферией круга. Тепловой источник в зоне контакта шлифовального круга с деталью представим в виде сплошного плоского источника тепла или в виде дискретно действующих в пределах зоны контакта точечных тепловых источников от абразивных зерен круга.

В первом случае теплообмен при плоском шлифовании схематизируется следующим образом: по поверхности полубесконечного тела, которое омывается охлаждающей жидкостью, движется полосовой источник тепла. Плотность теплового потока по всей поверхности источника описывается некоторой функцией.

Во втором случае за источник тепла принимают абразивные зерна, полагая, что шлифовальный круг касается детали только режущими зернами.

В случае шлифования без охлаждения смазочно-охлаждающей жидкостью, можно пренебречь теплообменом с воздухом и считать поверхность теплоизолированной за пределами зоны контакта круга с деталью. В этом случае на шлифуемой поверхности задают граничные условия 2-го рода – тепловой поток действует только в зоне контакта и теплоизоляция вне зоны контакта.

При шлифовании с охлаждением теплообмен с зоной контакта задается граничными условиями третьего рода по закону Ньютона – Рихмана

$$q = \alpha(T_0 - T_c),$$

где T_c – температура окружающей среды; T_0 – температура поверхности; α – коэффициент теплообмена.

Зону контакта в зависимости от цели исследования моделируют в виде:

1. Точечного источника (при решении одномерных задач).
2. В виде линейного источника (двухмерный случай решения).
3. В виде бесконечной полосы (трехмерный случай).

Такие допущения оказывают влияние на распределение температуры в целом, но в центре зоны контакта рассчитанные температуры по указанным моделям отличаются незначительно.

Начальные условия в подавляющем большинстве случаев при рассмотрении температурных полей приравниваются к нулю.

Граничные условия определяются из эксперимента. Например, плотность теплового потока определяется из выражения

$$q = \frac{F_z V_{kp}}{S};$$

$$F_z = ct^\alpha S^\beta V_q^\gamma V_{kp}^\delta,$$

где F_z – тангенциальная составляющая силы резания; c , α , β , γ , δ – экспериментальные коэффициенты.

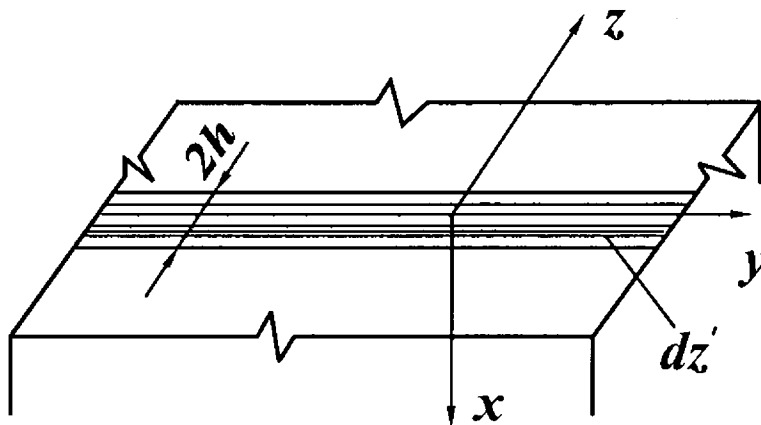


Рис. 5.19. Расчетная тепловая схема

Рассмотрим решение уравнения теплопроводности для схемы плоского шлифования. Тепловая схема полосового источника представлена на рис.5.19. По поверхности полубесконечного тела, которая омывается охлаждающей жидкостью, в положительном направлении оси z движется полосовой источник тепла шириной $2h$.

Математическая формулировка задачи сводится к решению уравнения теплопроводности

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{\partial T}{\partial z}. \quad (5.1)$$

С начальными и граничными условиями

$$-\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} + \alpha T \Big|_{x=0} = 0, \quad (5.2)$$

$$-\left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} = q = const, \quad T \Big|_{\tau=0} = 0.$$

Решение уравнения (5.1) (5.2) сводится к отысканию функции Грина (фундаментального решения)

$$dG = \frac{2q dy' dz' dt'}{c\gamma [4\pi a(\tau - \tau')]^{3/2}} \left[\exp\left(-\frac{R^2}{4a\tau}\right) - \frac{\alpha}{\lambda} \int_0^\infty \exp\left(-\frac{R'^2}{4a\tau} - \frac{\alpha}{\lambda} x'\right) dx' \right], \quad (5.3)$$

где $R^2 = x^2 + (y - y')^2 + (z - z' + V\tau)^2,$

$$R'^2 = (x - x')^2 + (y - y')^2 + (z - z' + V\tau)^2.$$

В принятой тепловой схеме тепловой источник имеет бесконечно большую протяженность по оси y . Поэтому интегрирование по y' должно быть выполнено от $-\infty$ до $+\infty$. Пределы интегрирования по z' равны $-h$ и $+h$, по времени — от 0 до ∞ .

Согласно принятой схеме, решение можно записать в виде

$$\begin{aligned}
 T(x, z) = & \int_{-h}^h dz' \int_{-\infty}^{\infty} dy' \int_0^{\infty} \frac{2q dt'}{c\gamma [4a\pi(\tau - \tau')]^{3/2}} \times \\
 & \times \exp \left\{ - \frac{x^2 + (y - y')^2 + (z - z' + V(\tau - \tau')^2)}{4a(\tau - \tau')} \right\} - \\
 & - \frac{\alpha}{\lambda} \int_0^{\infty} \exp \left\{ - \frac{(x - x')^2 + (y - y')^2 + (z - z' + V(\tau - \tau')^2)}{4a(\tau - \tau')} - \frac{\alpha}{\lambda} x' \right\} dx. \quad (5.4)
 \end{aligned}$$

Физическая часть задачи может считаться на этом законченной, так как дальше необходимо проделать чисто математические операции для приведения решения к виду, удобному для анализа и практического применения. С введением в уравнение (5.4) безразмерного комплекса, характеризующего интенсивность теплообмена $\beta = \frac{2\alpha a}{\lambda v}$, который представляет собой отношение двух известных критериев подобия $Bi = \frac{\alpha h}{\lambda}$ – критерий Био и $Pe = \frac{Vh}{2a}$ – критерий Пекле, Сипайловым В.А. [19] получено окончательное решение

$$\begin{aligned}
 T(X, Z) = & \frac{2qa}{\pi\lambda V} \int_{Z-H}^{Z+H} \exp(-\xi) k_0 \left(\sqrt{X^2 + \xi^2} \right) \times \\
 & \times \left\{ 1 - \beta \exp(\beta X) \frac{\int_0^{\infty} \exp(-\beta X) k_0 \left(\sqrt{X^2 + \xi^2} \right) dX}{k_0 \sqrt{X^2 + \xi^2}} \right\} d\xi, \quad (5.5)
 \end{aligned}$$

где $X = \frac{Vx}{2a}$; $Z = \frac{Vz}{2a}$ – безразмерные координаты; $H = \frac{Vh}{2a}$ – безразмерная полуширина источника; $\beta = \frac{2\alpha a}{\lambda V}$ – безразмерный комплекс, характеризующий интенсивность теплообмена; V – скорость детали, м/с; $2h$ – ширина зоны контакта, м; a – коэффициент теплопроводности, м²/с; $k_0(x)$ – модифицированная функция Бесселя второго рода, нулевого порядка; q – интенсивность теплового потока, Вт/м²; λ – коэффициент теплопроводности, Дж/(м²·с·град).

При больших скоростях теплового источника можно пренебречь влиянием теплоотдачи и считать поверхность теплоизолированной. Принимаем $\beta=0$, тогда решение (5.5) приобретает более простой вид

$$T(X, Z) = \frac{2qa}{\pi\lambda V} \int_{Z-H}^{Z+H} \exp(-\xi) k_0\left(\sqrt{X^2 + \xi^2}\right) d\xi. \quad (5.6)$$

Если выражение интеграла (5.6) представить в виде

$$j(u) = \int_0^u \exp(-\xi) k_0\left(\sqrt{X^2 + \xi^2}\right) d\xi, \quad (5.7)$$

то решение можно представить в виде следующего выражения

$$T(X, Z) = \frac{2qa}{\pi\lambda V} [j(Z+H) - j(Z-H)]. \quad (5.8)$$

Для поверхности ($X=0$) интеграл (5.7) имеет вид

$$j(u) = \int_0^u \exp(-\xi) k_0(\xi) d\xi. \quad (5.9)$$

Решение данного интеграла без СОЖ ($\beta = 0$) в интервале изменения аргумента u от -30 до $+4$ представлено на рис. 5.20. Пользуясь данным решением, функцию (5.9) можно представить в виде

$$\theta = j(Z+H) - j(Z-H). \quad (5.10)$$

По уравнению (5.10) можно найти в дискретных точках поверхности Z_i безразмерную температуру θ и построить кривую изменения температуры в пределах зоны контакта круга с изделием и за зоной контакта.

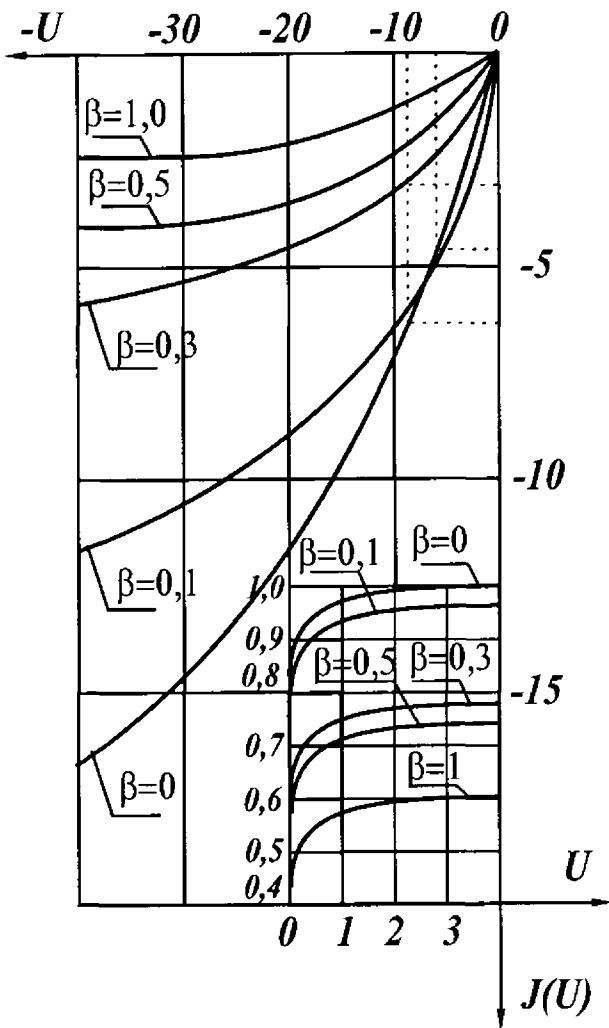


Рис. 5.20. График для расчета температуры на поверхности для различных значений β

Методику расчета температуры при шлифовании рассмотрим на конкретном примере. На станке 3Г71 шлифовались образцы из стали Р6М5 ($a = 8,15 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$; $\lambda = 0,5 \cdot 10^2 \text{ Вт/м}\cdot\text{град}$) на режиме $V_{kp} = 30 \text{ м/с}$, $V_d = 0,05 \text{ м/с}$, $t = 4 \cdot 10^{-4} \text{ м}$, $D_{kp} = 0,25 \text{ м}$, ширина образца $0,008 \text{ м}$, $q = 48 \cdot 10^6 \text{ Вт/м}^2$.

Последовательность этапов расчета:

1. Определяется ширина зоны контакта в направлении вектора скорости перемещения теплового источника. В данном случае для плоского шлифования периферией круга эта величина определяется по формуле

Последовательность этапов расчета:

1. Определяется ширина зоны контакта в направлении вектора скорости перемещения теплового источника. В данном случае для плоского шлифования периферией круга эта величина определяется по формуле

$$2h = \sqrt{D_{kp}t} = \sqrt{250 \cdot 0,04} = 3,16 \text{ мм}.$$

Определяется безразмерная полуширина зоны контакта

$$H = \frac{V_d h}{2a} = \frac{0,05 \cdot 0,99158}{2 \cdot 8,15 \cdot 10^{-6}} = 4,8.$$

2. На оси Z назначаются дискретные точки для расчета температуры. Например, $Z=H$; $Z=0,5H$; $Z=0$; $Z=-0,5H$; $Z=-H$; $Z=-2H$; $Z=-3H$ и т. д.

Безразмерная температура θ определяется по формуле (5.10). Например, для определения температуры на задней кромке теплового источника при $Z = -H$, $\frac{Z}{-H} = -1$ в формуле (5.10) подставляется вместо Z расчетная величина $-H = -4,8$

$$\theta = j(-4,8 + 4,8) - j(-4,8 - 4,8) = j(0) - j(-9,6).$$

По кривой $\beta=0$ (рис. 5.20) или из табл. 15 приложения $J(Z-H)$ определяются интегралы $j(u)$: $j(0) = 0$; $j(-9,6) = -6,95$.

Откуда

$$\theta = 0 - (-6,95) = 6,95.$$

Для определения размерной температуры следует безразмерную температуру умножить на множитель $\frac{2qa}{\pi\lambda V_d}$,

$$T = \frac{2qa}{\pi\lambda V_d} \theta = \frac{2 \cdot 48 \cdot 10^6 \cdot 8,15 \cdot 10^{-6}}{3,14 \cdot 0,5 \cdot 10^2 \cdot 0,05} = 99,97\theta,$$

$$T = 99,97 \cdot 6,95 = 695^\circ \text{C}.$$

Безразмерная температура в точке $Z=0$ определяется из выражения

$$\theta = j(0 + 4,8) - j(0 - 4,8) = j(4,8) - j(-4,8).$$

Интеграл с положительным значением аргумента определяется по кривой, размещенной в правом нижнем квадрате рис.5.20 для $\beta=0$ или по таблице приложения 15: $j(4,8) = 1$.

Интеграл с отрицательным значением аргумента определяется по кривой (рис.5.20) $\beta=0$ или по таблице прилож. 15 $j(-4,8) = -4,6$.

Откуда

$$\theta = 1 - (-4,6) = 5,6.$$

В табл. 5.3 представлены расчетные значения температур на поверхности $X=0$.

Т а б л и ц а 5.3

$X=0$							
Z	$-3H$	$-2H$	$-H$	$-0,5H$	0	$0,5H$	H
θ	2,9	3,88	6,95	6,75	5,6	4,113	1,0
$T^{\circ}C$	289	386,7	695	672	560	410	99,67

На рис. 5.21 представлены кривые изменения температуры на поверхности $X=0$ и на глубине $X=1$.

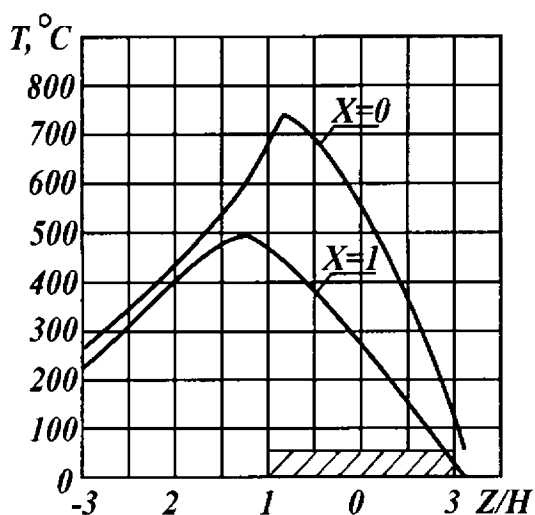


Рис. 5.21. Кривые изменения температуры на поверхности $x=0$ и на глубине $x=1$

На поверхности $X=0$ максимальная температура достигает $695^{\circ}C$, ее максимум находится около задней кромки теплового источника.

На глубине $0,336$ мм ($X=1$) температура близка к $500^{\circ}C$, а максимум температуры смещен по ходу движения теплового источника.

При шлифовании с охлаждением последовательность расчета температурных полей аналогична, но безразмерную температуру следует рассчитывать по формуле:

$$\theta = k[j(Z+H) - j(Z-H)].$$

Для поверхности $X=0$ интеграл (5.7) имеет вид

$$j(u) = \int_0^u \exp(-\xi) k_0(\xi) d\xi - \beta \int_0^u \exp(-\xi) \int_0^{\infty} k_0(\xi) d\xi. \quad (5.12)$$

На рис.5.20 приведены кривые изменения функции $j(u)$ для значений $\beta=0,1$; $\beta=0,3$; $\beta=0,5$; $\beta=1,0$, а на рис.5.22 представлены кривые изменения множителя k .

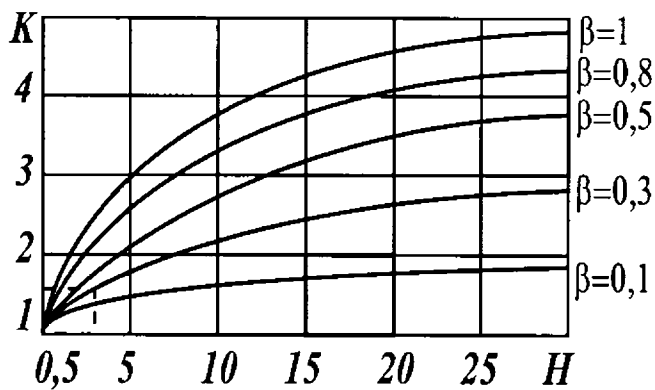


Рис. 5.22. Зависимость коэффициента k от безразмерной полуширины теплового источника H

Безразмерный комплекс β , учитывающий теплообмен, определяется из выражения $\beta = \frac{2\alpha a}{\lambda V}$.

При жидкостном охлаждении со скоростью расхода СОЖ 5 м/с безразмерный комплекс $\beta=0,3$. Из графика рис. 5.22 определяется коэффициент $k=1,4$.

Безразмерная температура на задней кромке теплового источника при $Z=H$ определяется из выражения

$$\theta = k[j(-4,8 + 4,8) - j(-4,8 - 4,8)] = k[j(0) - j(-9,6)].$$

Из графика (рис. 5.20) по кривой $\beta=0,3$ находим $j(-9,6) = -3,6$.

Безразмерная температура будет равна

$$\theta = k[(0) - (-3,6)] = 1,4 \cdot 3,6 = 5,04.$$

Из сопоставления данных видно, что применение СОЖ снижает температуру на поверхности с 695 до 503,8°C.

5.9 ВЛИЯНИЕ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

Качество поверхностного слоя оказывает влияние на износостойкость трущихся поверхностей, на коррозионную стойкость деталей и на прочность неподвижных соединений.

5.9.1. Влияние качества поверхности на износостойкость трущихся поверхностей

Износостойкость трущихся поверхностей существенно зависит от высоты неровностей и направления штрихов обработки. В начальный период работы контакт трущихся поверхностей происходит по

вершинам неровностей. Фактическая поверхность контакта составляет всего лишь 5–10% от расчетной, поэтому на площадках контакта возникают большие давления, величина которых в ряде случаев превышает предел текучести материала. В точках контакта происходит пластическая деформация, смятие и срез неровностей, приводящих к интенсивному начальному износу поверхностей сопряженных деталей и увеличению зазора между сопряженными трущимися деталями. Повышение мгновенных температур в локальных точках контакта и срыв окисной пленки, покрывающей металлы, создают благоприятные условия для молекулярного сцепления контактирующих поверхностей с образованием узлов адгезионного схватывания и интенсивного износа.

Исследования А.А. Маталина [18] показали, что форма неровностей при одинаковой высоте R_z оказывает существенное влияние на износ трущихся деталей. На рис.5.23 представлены кривые износа поверхностей, имеющих различную форму неровностей и одинаковую высоту R_z .

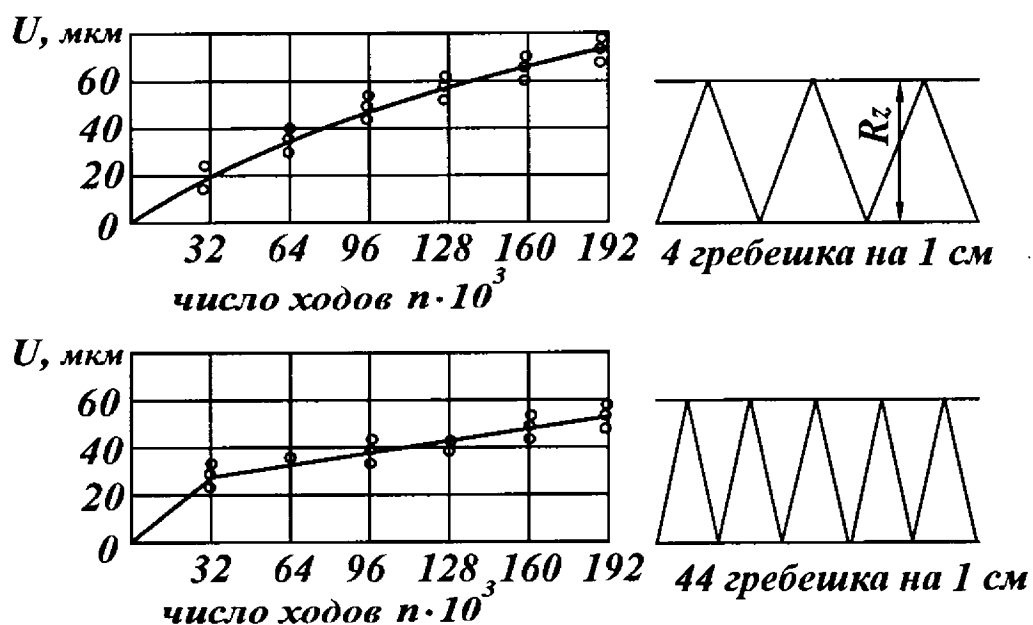


Рис. 5.23. Кривые износа

Приведенные данные показывают, что после 160000 двойных ходов износ поверхностей, имеющих большой шаг неровностей, составил 66 мкм, а поверхности с малым шагом – только 45 мкм.

Эксперименты профессора П.Е. Дьяченко [67] показали, что во время начального износа, протекающего в период приработки, происходит изменение размеров и формы неровностей.

Высота неровностей в ряде случаев уменьшается или увеличивается, приближаясь к какой-то конкретной оптимальной высоте. На рис. 5.24 показана зависимость изменения высоты шероховатости Rz от времени приработки трущихся поверхностей.

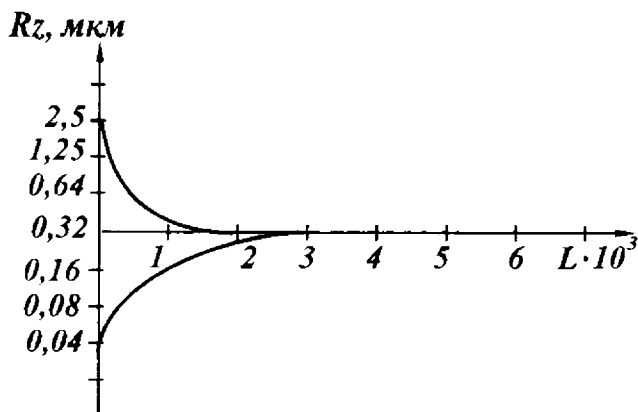


Рис. 5.24. Изменение шероховатости по мере приработки

Из рисунка видно, что если высота шероховатости трущихся поверхностей в исходном состоянии имеет высоту шероховатостей Rz меньше оптимальной, то в процессе приработки она увеличится до оптимального значения $Rz_{\text{опт}}$ и, наоборот, если высота неровностей в исходном состоянии имеет большее значение Rz по сравнению

с оптимальной, то в процессе приработки она уменьшится до оптимальной. Оптимальное значение высоты шероховатости сопряженных деталей обеспечивает оптимальную маслостойкость стыка трущихся поверхностей (жидкостное трение).

На рис. 5.25 показана зависимость износа от высоты неровностей [67]. Кривые износа 1 и 2 показывают, что при оптимальной высоте неровностей (точки C_1 и C_2) износ металла имеет наименьшую величину. В более тяжелых условиях работы (кривая 2) точка оптимальной высоты шероховатости смещается в сторону большей шероховатости, а величина оптимального износа смещается вправо и вверх. Увеличение высоты шероховатости, по сравнению с оптимальной, увеличивает износ за счет возрастания скалывания, среза и смятия выступающих неровностей поверхности. Уменьшение высоты шероховатости, по сравнению с оптимальной, приводит к резкому возрастанию износа в связи с возникновением молекулярного сцепления и заедания плотно соприкасающихся поверхностей повышенной гладкости. Зеркально

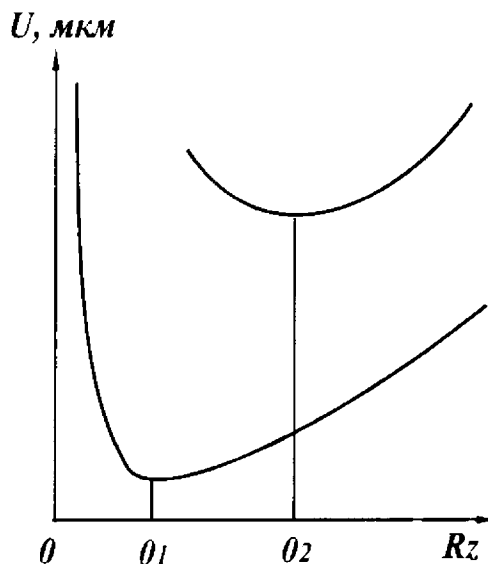


Рис. 5.25. Зависимость износа u от высоты шероховатости

чистые поверхности, имея плохую смачиваемость, не удерживают смазку между трущимися поверхностями.

Задачей конструктора, проектирующего новые машины, является назначение такой шероховатости трущихся поверхностей, которая соответствует ее оптимальному значению. Однако следует заметить, что в технической литературе отсутствуют рекомендации, позволяющие назначить оптимальную шероховатость, при которой износ и коэффициент трения при реальных условиях нагружения работающей пары будут минимальны.

Чтобы решить данную задачу, надо найти условия, обеспечивающие оптимальную маслосъемность стыка, при которой между трущимися поверхностями сохраняется устойчивый масляный слой, создающий условия жидкостного трения пары. Такие условия можно обеспечить, если на поверхность пары трения-скольжения нанести масляные карманы в виде углублений, удерживающих смазку.

Масляные карманы можно наносить с помощью специальной сегментной головки на плоско- или круглошлифовальных станках.

Данный способ [21] в отличие от известных [25] способов нанесения масляных карманов, позволяет наносить постоянный рельеф на поверхность пары трения-скольжения, имеющую твердость HRC 60 – 63. Масляные карманы имеют закрытую форму и приближаются к профилю, создающему гидродинамический клин в момент запуска машины. Сегментные головки представляют собой набор сегментов,

имеющих длину $l_1 = \frac{1}{3} \cdots \frac{1}{4} \pi d_{кр}$.

5.9.2. Влияние качества поверхности на прочность и коррозионную стойкость деталей

Усталостная прочность деталей существенно зависит от величины, знака и глубины распространения остаточных напряжений поверхностного слоя. Например, остаточные напряжения сжатия повышают предел выносливости детали, а напряжения растяжения – снижают. Между пределами выносливости и остаточными напряжениями поверхностного слоя существует прямая зависимость [18]

$$\sigma_{-1} = A - B\sigma_{ост},$$

где σ_{-1} – предел выносливости детали после шлифования; $\sigma_{ост}$ – остаточные напряжения поверхностного слоя, возникающие после шлифования на различных режимах; A и B постоянные коэффициенты.

Зависимость $\sigma_{-1} = f(\sigma_{ост})$ справедлива для комнатной температуры. Нагревание материала, например, до температур, при которых работают детали в двигателях внутреннего сгорания, ослабляет влияние остаточных напряжений на усталостную прочность.

Структурные изменения, происходящие под воздействием высоких температур в зоне контакта шлифовального круга с деталью, снижают долговечность деталей машин. Например, снижение твердости на боковых поверхностях зубьев с HRC 60 – 62 до HRC 50 – 52 снижает долговечность зубчатых колес в 5 – 8 раз [32]. Наличие прижога на кромках вырубных штампов снижает их стойкость в 30 раз [56].

При обработке под воздействием пластической деформации металла в поверхностном слое детали возникают микронеоднородности, которые способствуют появлению коррозионных микроэлементов. Более наклепанные ферритные зерна становятся анодами, а менее наклепанные перлитные зерна – катодами. В зонах выхода дислокаций на поверхность возникает адсорбция и развиваются коррозионные и диффузионные процессы.

Пластически деформированный поверхностный слой материала имеет увеличенный удельный объем и меньшую плотность. Это обстоятельство способствует более интенсивному протеканию диффузионных процессов, а при высоких температурах – более интенсивному выгоранию легирующих элементов и понижению сопротивляемости металла отрыву. Наклеп и остаточные напряжения поверхностного слоя при длительном статическом напряжении в коррозионных средах вызывают коррозионное растрескивание.

Однако следует заметить, что после обдувки дробью или накачивания роликами происходит завальцовывание путей проникновения коррозионных сред внутрь металла через дефекты поверхности пластически деформируемого феррита. При этом уменьшаются коррозионные процессы и повышается усталостная прочность деталей.

Наклеп поверхностного слоя снижает магнитные свойства магнитомягких материалов типа пермаллой и др. В связи с этим при механической обработке этих материалов наклеп недопустим.

5.10. КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ СТАБИЛИЗАЦИЯ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ

5.10.1. О механизме структурных превращений при шлифовании

Природа структурных превращений при шлифовании вытекает из анализа диаграммы железо-углерод. Если при шлифовании температура нагрева поверхностного слоя близка, но пока не превышает критическую точку A_{C1} , то в поверхностном слое мартенситная структура распадается с образованием троостита и троосто-мартенсита.

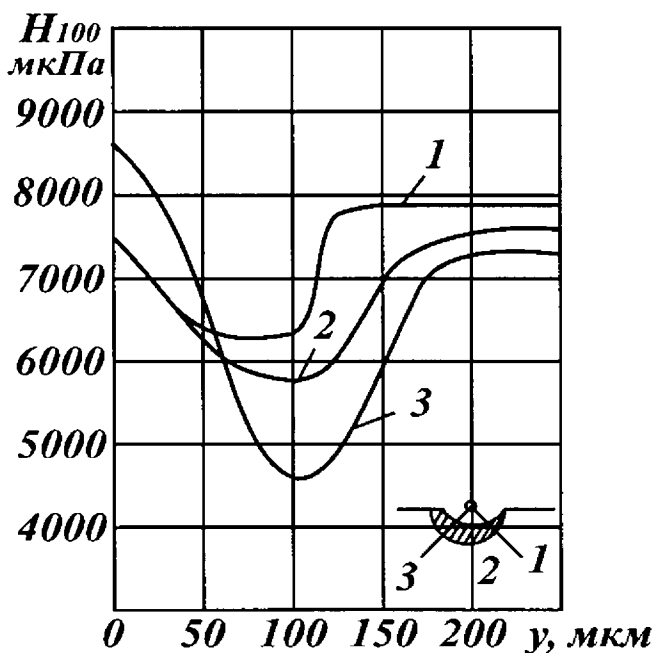


Рис. 5.26. Кривые изменения микротвердости в поверхностном слое в различных сечениях профиля резьбы ходового винта

Если в поверхностном слое температура превысит точку A_{C1} при скорости охлаждения выше критической скорости закалки, то образуется вторично-закаленный слой с образованием структуры аустенито-мартенсита.

На поверхности обнаруживается белый нетравящийся слой с повышенным процентным содержанием аустенита, который имеет твердость выше, чем до шлифования. За вторично закаленным слоем залегает отпущенный слой троостито-сорбитной структуры с заниженной твердостью.

На рис.5.26 представлены кривые изменения микротвердости в поверхностном слое нитки резьбы ходовых винтов с накопленной погрешностью в шаге 0,38 мм. Неравномерность снимаемого припуска $t=0,38$ мм (сечение 3), $t=0,15$ мм (сечение 2), $t=0,04$ мм (сечение 1) на различных участках профиля, обусловленная растяжкой или усадкой винта при термической обработке, вызывает различные структурные превращения.

Градиенты физико-химических свойств (твердость, пластичность, прочность) вызывают на границах фаз появление концентраторов напряжений, которые существенно искажают общую картину напряженного состояния. Именно на границах раздела фаз или на границах зерен, где наиболее вероятно скопление интерметаллоидных включений цементитной сетки и других дефектов, возможно появление очагов разрушений.

Следует заметить, что при больших скоростях нагрева и охлаждения структурные превращения в материалах протекают по диаграмме метастабильных превращений Fe→C, которая существенно отличается от обычной диаграммы равновесия Fe – C.

На рис. 5.27 [57], [58] представлена метастабильная диаграмма сплава Fe – C. На данной диаграмме линии имеют следующий физический смысл:

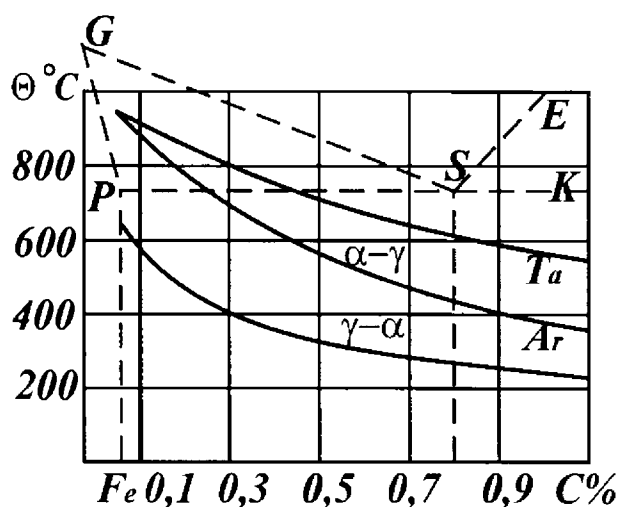


Рис. 5.27. Метастабильная диаграмма сплава Fe-C

A_r – температура бездиффузионного превращения аустенита в мартенсит;

T_a – температура бездиффузионного превращения мартенсита в аустенит.

Штриховыми линиями показана диаграмма равновесия.

Диаграмма метастабильных превращений позволяет уточнить природу фазовых превращений при шлифовании закаленных сталей.

При больших скоростях нагрева бездиффузионное превращение мартенсита в аустенит наступает при температуре T_a , которая значительно ниже температуры A_{C1} . Последующее быстрое охлаждение фиксирует образовавшийся аустенит, формируя вторично-закаленный слой с аустенито-мартенситной структурой. Под вторично-закаленным слоем залегает отпущенный слой тростно-мартенситной структуры, переходящий через все стадии отпуска в структуру исходного термически обработанного материала. При больших скоростях нагрева и охлаждения распад остаточного аустенита может быть частично или полностью подавлен.

После шлифования закаленной стали процентное содержание аустенита колеблется в широких пределах. Например, в работах проф. Костецкого Б.И. [59] показано, что после шлифования закаленной стали У8А содержание остаточного аустенита на поверхности достигает 90 – 95%.

Установлено, что любой режим шлифования стали 12Х2Н4А увеличивает процентное содержание аустенита. Обработка холодом и увеличение температуры отпуска уменьшает количество остаточного аустенита.

В табл.5.4 представлены результаты измерения процентного содержания аустенита закаленной стали 12Х2Н4А после закалки и отпуска, после шлифования кругом 24А25НСМ2К5 и после обработки холодом в среде жидкого азота.

Т а б л и ц а 5.4 Количество аустенита в %

Вид обработки	Температура отпуска °С				
	140	180	200	220	240
После закалки	18,2	18,0	16,6	15,8	11,0
После шлифования	35	31	23,4	20,5	18,0
После обработки холодом	22,6	25,2	22	19	15

Приведенные в таблице данные показывают, что после шлифования процентное содержание аустенита возрастает. Обработка холодом уменьшает процентное содержание аустенита.

Нами установлено, что в различных плавках хромоникелевых сталей, например, 12Х2Н4А, 18Х2Н4А и др., переход аустенита в мартенсит при охлаждении происходит при различных температурах.

Например, в некоторых плавках хромоникелевых сталей превращение аустенита в мартенсит $\gamma \rightarrow \alpha$ происходит в диапазоне изменения температур $A_r = 400 \div 500^\circ\text{C}$, а в других $A_r = 100 \div 150^\circ\text{C}$.

Следует заметить, что процесс превращения $\gamma \rightarrow \alpha$ сопровождается увеличением удельного объема материала, так как мартенсит имеет больший удельный объем (атомную решетку объемноцентрированного куба), а аустенит имеет меньший удельный объем (решетку гранцентрированного куба). При охлаждении поверхностный слой материала деталей в силу физических его свойств уменьшается в объеме. Но этому уменьшению оказывают сопротивление глубинные слои, которые в данный момент времени имеют значительно

большую температуру по сравнению с поверхностной. Возникающее силовое поле вызывает появление в поверхностном слое временных термоупругих напряжений растяжения, величина которых по мере охлаждения поверхности возрастает.

Таким образом, на формирование временных термоупругих напряжений в поверхностном слое оказывают влияние два противоборствующих фактора: охлаждение поверхностных слоев уменьшает объем материала, а структурные $\gamma \rightarrow \alpha$ превращения увеличивают объем.

Результирующая напряженность материала будет зависеть от температуры, при которой произойдет частичная компенсация тепловых напряжений за счет структурных превращений. Следовательно, чем выше критическая точка перехода аустенита в мартенсит при охлаждении, тем меньше будет величина растягивающих остаточных напряжений.

Стали, имеющие критическую точку структурных $\gamma \rightarrow \alpha$ превращений $350 - 400^\circ\text{C}$, не склонны к появлению шлифовочных трещин. Стали, имеющие критическую точку $\gamma \rightarrow \alpha$ превращения $100 - 150^\circ\text{C}$ чрезмерно предрасположены к появлению трещин, так как здесь тепловые напряжения не уравниваются в области высоких температур $350 - 400^\circ\text{C}$ с напряжениями от структурных превращений. При охлаждении в интервале температур от $750 - 800^\circ\text{C}$ до $200 - 250^\circ\text{C}$ временные термоупругие напряжения достигают значений, соизмеримых с пределом прочности материала детали.

5.10.2. Влияние неравномерности распределения припуска на качество поверхностного слоя

Особенностью современного этапа развития технологии машиностроения является широкое использование автоматизированных станков, функционирующих в новых организационных условиях.

Стабилизацию качественных показателей обрабатываемых деталей можно осуществить только при условии оптимального управления средствами технологического оснащения при решении с единых методологических позиций конструкторских, технологических, экономических и организационных задач. Для решения технологических задач необходимо иметь технологический объект (средства технического оснащения), исходное задание (информационную модель

или чертеж детали, программу выпуска, технические условия), ограничения и основную цель (срок выпуска, производительность, качество поверхностного слоя и минимальные затраты).

Технологический процесс должен обеспечить выполнение всех требований по точности и качеству изделия, предусмотренных чертежом и техническими условиями при минимальной себестоимости в требуемом количестве и в установленные программой сроки.

В качестве объекта выберем зубчатое колесо $m=3$ мм, $Z=49$, $b=36$ мм 4-й степени точности, изготовленное из цементируемой стали 12Х2Н4А, глубина цементации 1,2 – 1,4 мм, твердость боковых поверхностей зубьев HRC – 60–62.

Типовой технологический процесс:

1. Заготовка-штамповка подверглась термической обработке (табл. 5.5).

Т а б л и ц а 5.5

Вид обработки	Температура °С	Продолжительность, ч
1.Нормализация	900 ± 10	1.
2.Закалка	870 ± 10	2.
3.Отпуск	500 ± 10	3.

2. Токарная обработка по контуру зубчатого колеса (черновая и чистовая).

3. Нарезание зубчатого венца однозаходной червячной фрезой ($m=3$ мм, $\alpha = 20^\circ\text{C}$, $D_{\text{фр}} = 80$ мм, $Z_{\text{фр}} = 12$).

4. Цементация в твердом карбюризаторе при температуре $900 \pm 10^\circ\text{C}$ с выдержкой 13 ч., высокий отпуск при $T = 650 \pm 10^\circ\text{C}$ с выдержкой в течение двух часов, закалка при температуре 840°C , обработка холодом в среде жидкого азота при температуре (-70°C) с выдержкой 2 часа и отпуск при $T = 160 \pm 10^\circ\text{C}$ в течение 2,5 часа.

5. После химико-термической обработки создается база для дальнейшей обработки зубчатого венца (подвергается шлифованию наружный диаметр и торцы с базированием по отверстию).

При обработке отверстия в качестве установочной базы используется окружность выступов зубчатого венца.

После фрезерования зубьев, химико-термической обработки, восстановления комплекта установочных баз, контролировались дли-

на общей нормали V_w , радиальное биение зубчатого венца F_{rr} , относительная погрешность окружных шагов и погрешность направления зуба $F_{\beta r}$. По результатам измерений вычислялись: колебание длины общей нормали V_{wr} , наибольшая разность соседних шагов V_{pr} , колебание погрешности направления зуба $V_{F\beta r}$, предельное отклонение шага f_{ptr} и накопленная погрешность шага F_{pr} .

Показатели точности зубчатых колес в количестве 200 шт., вычисленные по результатам выборочных распределений погрешностей, представлены в табл. 5.6.

Т а б л и ц а 5.6

Виды обработки	Пределы значений показателей точности, мкм					
	F_{rr}	$V_{F\beta r}$	$F_{\beta r}$	F_{pr}	f_{ptr}	V_{wr}
Фрезерование	17–75	6–26	19–51	20–105	6–19	5–30
Цементация	20–85	12–75	30–80	–	6–17	10–35
Закалка	37–97	32–88	31–97	32–119	9–23	20–55
Восстановление баз	33–116	52–152	28–146	37–162	10–28	–

После химико-термической обработки на поверхности зубьев образуются дефекты в виде обезуглероженного слоя и наличия цементитной сетки. Глубина этого дефектного слоя достигает 0,05 – 0,08 мм. На операции зубошлифования этот дефектный слой желательно удалить. В противном случае указанные дефекты проявят себя с отрицательной стороны в процессе эксплуатации.

Припуск на операцию зубошлифования должен компенсировать толщину дефектного слоя Z_a , неточности предшествующей обработки Z_c и погрешности, связанные с наладкой станка Z_b . Толщина дефектного слоя Z_a включает высоту шероховатостей от предшествующей обработки, окалину и обезуглероженный слой от химико-термической обработки. Слой металла, компенсирующий погрешности от предшествующих операций Z_c , включает погрешность профиля f_{fr} , накопленную погрешность окружного шага F_{pr} , погрешность направления зуба $F_{\beta r}$.

$$Z_c = f_{fr} + F_{pr} + F_{\beta r}.$$

Указанные параметры регламентированы ГОСТ 1643 – 72. Однако с введением химико-термического упрочнения, назначение оптимальных величин припусков усложняется.

Высокотемпературные нагревы, резкие охлаждения, структурные превращения металла вызывают появление дополнительных погрешностей, возникающих в результате деформации зубчатого венца. Тепловые и структурные напряжения изменяют диаметральные и осевые размеры колеса, изменяют толщину зубьев, искажают плоскостность зубчатого торца. Причем величина этих искажений зависит от конструкции зубчатого колеса. На операции восстановления баз часто не удается повысить точность взаимного расположения основной конструкторской базы и зубчатого венца, поэтому часто на операцию зубошлифования поступают зубчатые колеса, имеющие 9–11 степеней точности (см. табл.5.6).

Для компенсации указанных погрешностей технологи вынуждены увеличивать припуски, полагая, что операция зубошлифования обеспечит необходимую точность. На операцию зубошлифования в этом случае возлагают, кроме основной ее функции (повышение точности), несвойственную ей функцию – удаление увеличенного припуска.

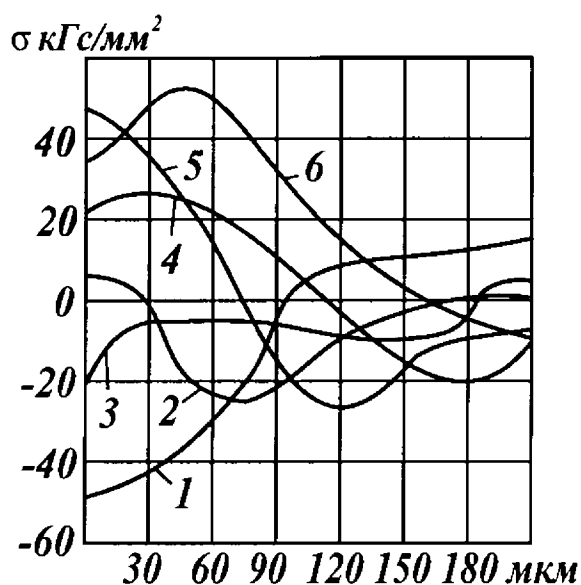


Рис.5.28. Кривые распределения остаточных напряжений в поверхностных слоях зубьев после зубошлифования

обнаружены сжимающие напряжения (20 кгс/мм^2), в других (кривые 2, 4, 6) – растягивающие, но разной величины ($20 - 60 \text{ кгс/мм}^2$). На секторе, состоящем из трех зубьев, в том числе на зубе 6, обнаружены прижоги и шлифовочные трещины, расположенные перпендикулярно

напряжения), несвойственную ей функцию – удаление увеличенного припуска. В результате, помимо возрастающих затрат времени на обработку, снижаются качество поверхности и эксплуатационные характеристики передач.

На рис. 5.28 представлены кривые распределения остаточных напряжений по глубине поверхностного слоя в зубьях одного и того же колеса из стали 12Х2Н4А ($\text{HRC} = 64 \div 65$) после операции зубошлифования [32]. На одном из зубьев (кривая 3)

траектории движения круга. Различная напряженность поверхностных слоев зубьев на одном и том же колесе объясняется неравномерностью снимаемого припуска с боковых поверхностей зубьев из-за имеющихся отклонений в шаге и наличия кинематических погрешностей и радиального биения. Эти погрешности формируются, как видно из табл. 5.6, на протяжении всего технологического процесса до операции зубошлифования.

Для разработки рекомендаций по стабилизации качественных показателей зубчатых колес необходимо выяснить причины, вызывающие различную напряженность в зубьях шестерен.

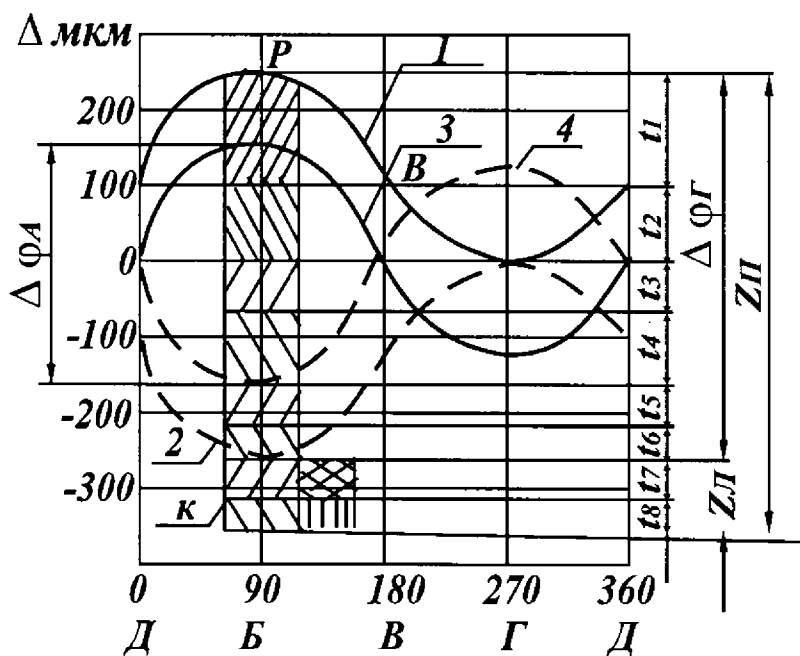


Рис. 5.29. Распределение припуска на боковых поверхностях зубьев на операции зубошлифования

Для решения поставленной задачи проанализируем процесс шлифования зубчатого колеса, имеющего радиальное биение $F_{rr} = 140$ мкм и колебание длины общей нормали $V_{wr} = 124$ мкм.

На рис. 5.29 показано распределение припуска на боковых поверхностях правого (кривая 1) и левого (кривая 2) профилей зубьев при

настройке зубошлифовального станка по впадине (Г). Настройка по впадине (Г) заключается в том, что шлифовальный круг во впадине (Г) вводится в соприкосновение с правой и левой боковыми поверхностями зубьев. В этом положении зубчатое колесо закрепляется на оправке. Обработка зубьев начинается с максимально бьющего зуба (позиция Р).

Контурная (кривая 1) рис. 5.29 показывает характер изменения суммарной радиальной погрешности правых эвольвентных профилей зубьев колеса, а штриховая (кривая 2) показывает изменение суммарной радиальной погрешности левых эвольвентных профилей зубьев. Чтобы устранить черновины на всех зубьях шестерни при данной на-

стройке станка, необходимо с боковой поверхности зуба P удалить припуск $\Delta\varphi_{\Gamma} = 500$ мкм. При удалении общего припуска $\Delta\varphi_{\Gamma}$ глубины резания t_1, t_2, t_3, \dots назначаются из условий бездефектной обработки. Шлифование производят с такими режимами, чтобы глубины дефектных слоев, возникающих в поверхностном слое зуба, расположенного в позиции P , при шлифовании на очередном проходе не превышали припуск, оставшийся под последующие проходы. Заштрихованными зонами на рис. 5.29 показаны глубины слоев, срезаемых за каждый проход. Следует обратить внимание, что на первом и втором проходах припуск удаляется только с правых боковых поверхностей зубьев. Причем на различных зубьях глубины изменяются от нуля (точка Γ при повороте колеса на 270°) до максимума (зуб P при повороте колеса на 90°)

$$\Delta_{\max} = t_1 + t_2 = 150 + 100 = 250 \text{ мкм.}$$

В точке Γ (угол 270°) произойдет касание правого и левого профилей зубьев с кругом. На последующих проходах (3, 4, 5, 6) припуск будет удаляться со всех правых и частично с левых боковых поверхностей зубьев. Причем со всех правых боковых поверхностей зубьев будут удаляться одинаковые припуски (t_3, t_4, t_5, t_6).

В точке K будет удален с боковой поверхности правого профиля суммарный слой, равный

$$\Delta\varphi_{\max} \cos 20^\circ = 500 \cdot 0,9397 = 469,85 \text{ мкм,}$$

а с боковой поверхности левого профиля зуба K произойдет только касание круга. В этой точке K будут полностью устранены черновины на всех боковых поверхностях зубьев колеса.

Однако в данном положении, когда будут устранены черновины и зубчатое колесо достигнет требуемой точности, еще нельзя считать обработку законченной. После химико-термической обработки в поверхностном слое зубьев образуются дефекты в виде обезуглероженного слоя или цементитной сетки. Этот дефектный слой должен быть удален.

Следует заметить, что за 6 проходов данный дефектный слой удаляется почти со всех зубьев колеса за исключением нескольких 3 – 4 зубьев, находящихся вблизи точки K . Для удаления дефектного

слоя с левых боковых поверхностей этих 3 – 4 зубьев следует предусмотреть два дополнительных прохода с глубинами резания $t_7 = 0,04$ мм, $t_8 = 0,02$ мм. После завершения процесса зубошлифования в районе точки P с правых боковых поверхностей зубьев колеса будет удален общий припуск $Z_n = 560$ мкм, а с левых боковых поверхностей зубьев – $Z_{л} = 60$ мкм.

После цементации глубина цементированного слоя на боковых поверхностях зубьев колеблется в пределах 1,0–1,2 мм. После удаления припуска с боковой поверхности зуба $Z_n = 0,560$ мм глубина оставшегося цементированного слоя уменьшается до 0,44 – 0,64 мм.

Следовательно, при рассмотренной схеме настройки зубошлифовального станка по впадине Γ припуски, удаляемые с различных зубьев колеса, будут изменяться в широких пределах. Исходная твердость боковых поверхностей зубьев изменяется от 55 до 65 HRC, процентное содержание углерода изменяется от 1,1% до 0,7%.

Следует заметить, что на некоторых зубьях, находящихся в секторе AB (рис. 5.29), после первого прохода были обнаружены трещины. Для объяснения причин, вызывающих появление шлифовочных трещин на боковых поверхностях зубьев шестерни, рассмотрим зависимость критических точек структурных превращений от содержания углерода в материале цементированного слоя (рис. 5.27).

С увеличением процентного содержания углерода критическая точка $\gamma \rightarrow \alpha$ превращения (Мн) смещается в область более низких температур. Например, с увеличением содержания углерода в стали от 0,4% до 1,2% критическая точка $\gamma \rightarrow \alpha$ превращения уменьшается от 350°C до 150°C.

Приведенный анализ показывает, что при удалении с боковых поверхностей зубьев припуска в материале происходят сложные термодинамические процессы, протекающие в условиях многократного наложения температурных полей и изменяющихся физико-механических и химических свойств обрабатываемого материала.

Для стабилизации качественных показателей зубчатых колес надо устранить или хотя бы уменьшить колебание глубины снимаемого припуска на операции зубошлифования. Для решения этой задачи надо уменьшить деформацию заготовки при термической обработке, устранить или хотя бы уменьшить погрешность, возникающую при восстановлении баз и, наконец, найти способ оптимальной наладки станка, т. е. по мере возможности распределить более равно-

мерно снимаемый припуск на операции зубошлифования. Закалка в штампах уменьшает деформацию зубчатого венца. Уменьшить погрешность при восстановлении баз можно путем правильного выбора установочных баз.

Например, шлифование отверстия, которое служит установочной базой на операции зубошлифования, следует производить не от наружного диаметра, а от диаметра делительной окружности, устанавливая зубчатое колесо с помощью роликов по боковым поверхностям зубьев.

И, наконец, следует равномерно распределить припуск на операции зубошлифования, т. е. – оптимизировать наладку. Иными словами, надо найти такую впадину для ориентации зубчатого колеса относительно инструмента, которая сведет к минимуму колебание припусков на операции зубошлифования.

В рассматриваемом варианте (рис. 5.29) на операции зубошлифования ориентация круга по впадине D является наиболее оптимальной. Чтобы обеспечить касание боковых поверхностей зубьев с инструментом во впадине D , надо обеспечить касание правой и левой боковых поверхностей зубьев в этой точке. Для этой цели следует кривую 1 опустить вниз, совместив ее с точкой 0, а кривую 2 поднять вверх.

При наладке станка по впадине D по сравнению с наладкой по впадине (Γ) максимальный припуск уменьшается с $\Delta = 500$ мкм до $\Delta = 300$ мкм.

5.10.3. Влияние параметров термических циклов на качественные характеристики поверхностного слоя деталей

Термический цикл при механической обработке характеризует динамику процесса теплообмена: подвод тепла и рассеивание его в массе детали. Термический цикл состоит из трех основных стадий: нагрева, выдержки при высокой температуре и охлаждения. В стадии нагрева подвод тепла к фиксированной точке превалирует над его отводом в глубинные слои материала за счет теплопроводности и в окружающую среду за счет конвективного теплообмена. Во второй стадии устанавливается равновесие между подводом и отводом теплоты. Когда отвод теплоты превышает ее отвод, – наступает охлаждение.

В точках, удаленных от поверхности детали, максимальная температура уменьшается, увеличивается длительность цикла, уменьшаются скорости нагрева и охлаждения материала.

На рис.5.30 представлено температурное поле в поверхностном слое плоского образца из стали 12Х2Н4А при шлифовании кругом 24А25СМ16К на режиме $t=0,04$ мм, $S_n = 1,2$ мм/мин, $V_d=12$ м/мин.

В табл. 5.7 представлены скорости нагрева и охлаждения на поверхности $x = 0$ и в слоях, залегающих на глубинах $x = 0,14$ мм и $x = 0,28$ мм.

Т а б л и ц а 5.7

Скорость стола, м/мин	Скорость нагрева °С/с			Скорость охлаждения °С/с		
	$x=0$	$x=0,14$	$x=0,28$	$x=0$	$x=0,14$	$x=0,28$
4	10000	7000	3800	6000	3200	1500
12	14000	9700	6500	7000	4200	2000

В глубинных слоях детали максимальные температуры и скорости нагрева и охлаждения уменьшаются, но длительность нагрева

увеличивается. Следует обратить внимание, что на третьей стадии термического цикла глубинные слои имеют более высокую температуру по сравнению с поверхностью. Это явление наиболее заметно проявляется при малых скоростях движения теплового источника, например, при глубинном шлифовании.

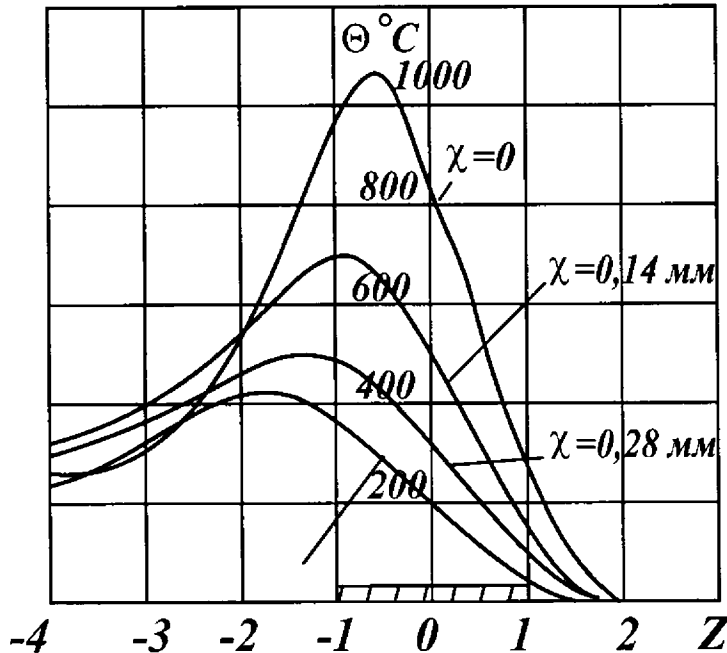


Рис.5.30. Температурное поле

Формирование структуры при шлифовании связано с уровнем энер-

гетического воздействия на поверхность детали, а также с рядом особенностей самого процесса шлифования, протекающего с чрезмерно большими скоростями нагрева и охлаждения.

При некоторых режимах шлифования контактные температуры превышают критические точки структурных превращений. Длительность теплового воздействия при температуре фазового перехода обеспечивает условия перехода перлита и структурно свободного феррита в аустенит. Последующее охлаждение со скоростями, явно превышающими критические скорости закалки, обеспечивает условие для возникновения мартенситной структуры. Однако механизм формирования структуры в поверхностном слое детали при шлифовании зависит от целого ряда дополнительных факторов, которые необходимо учитывать при обеспечении стабильных физико-механических свойств материала. К числу факторов, оказывающих существенное влияние на стабильность формирования структуры, следует отнести: наличие процесса самоотпуска, многократность наложения термических циклов на обрабатываемую поверхность при многопроходном шлифовании, кратковременность процессов аустенизации и наличие различных по величине удельных нагрузок в зоне контакта круга с деталью.

Под влиянием указанных факторов нарушается стабильность формирования структуры поверхностного слоя, которая предопределяет, в конечном итоге, долговечность деталей машин.

При нагреве поверхности до температуры выше A_{C1} с последующим интенсивным охлаждением в поверхностном слое формируется аустенито-мартенситная структура закалки с твердостью, превышающей исходную твердость до шлифования.

При шлифовании с малыми скоростями перемещения теплового источника и наличии обильного охлаждения температура поверхности становится ниже температуры глубинных слоев. При этих условиях тепловой поток из глубинных слоев будет направлен не только во внутренние слои металла, но и в более холодный поверхностный уже ранее закаленный слой. В результате дополнительного подогрева в поверхностном слое произойдет самоотпуск, образуется структура троостомартенсита с заниженной твердостью.

При шлифовании с малыми глубинами резания и большими скоростями перемещения теплового источника в поверхностном слое материала процесс полной аустенизации в ряде случаев не успевает завершиться.

5.11. МЕТОДЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ДЕТАЛЕЙ

Окончательная обработка оказывает большое влияние на качество поверхностного слоя деталей и в связи с этим на их эксплуатационные свойства. Наиболее распространенными методами окончательной обработки деталей являются абразивно-алмазные процессы.

На машиностроительных заводах проблема улучшения качества поверхностного слоя деталей в основном решается подбором оптимальных режимов обработки и соответствующей характеристики инструмента. Однако методы окончательной обработки деталей не позволяют полностью исключить появление дефектов, возникающих в поверхностном слое. Этому препятствуют неизбежные колебания припуска в связи с погрешностями от предшествующих операций механической обработки, коробление деталей при термической обработке, колебания шпинделя и наличие других дефектов, зависящих от самого процесса обработки. В связи с этим изучение новых технологических методов и параметров, включая систему инструмент – деталь – рабочая среда, в решении проблемы улучшения качества поверхностного слоя деталей, является важной задачей и имеет большое научное и практическое значение. Например, стабильное качество поверхностного слоя при шлифовании и высокую производительность можно обеспечить при шлифовании деталей кругами с прерывистой рабочей поверхностью.

Для обеспечения стабильного качества поверхностного слоя необходимо разработать способ управления теплонапряженностью процесса шлифования. Теплонапряженность процесса шлифования можно стабилизировать путем прерывистого процесса резания до того момента, пока не произошло тепловое насыщение, путем применения адаптивных систем управления процессом шлифования и путем импрегнирования шлифовальных кругов.

5.11.1. Сущность процесса прерывистого шлифования

Температуру в зоне шлифования можно понизить, если шлифование производить с определенными интервалами, причем продолжительность резания между этими интервалами сделать меньше времени теплового насыщения металла и за время разрыва процесса охладить поверхность детали. Под тепловым насыщением понимается

такое состояние поверхности, когда ее температура, достигнув максимума, сохраняется определенное время.

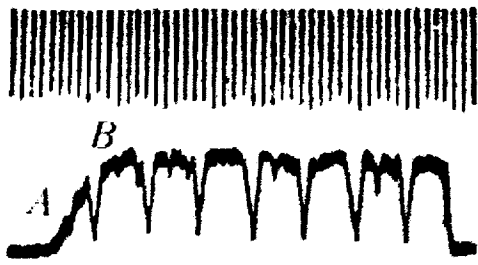


Рис. 5.31. Осциллограмма изменения температуры в зоне контакта шлифовального круга

За счет прерывистого процесса резания можно значительно уменьшить температуру в зоне резания и избежать появления дефектов шлифования, ухудшающих эксплуатационные свойства деталей. Такой процесс можно осуществить при шлифовании кругами, имеющими на рабочей поверхности ряд чередующихся выступов и впадин определенной протяженности.

На рис. 5.31 показана осциллограмма записи температуры специальной термопарой. На рабочей поверхности круга 1 в специальных канавках (рис.5.32) монтировались термоэлектроды из нихромовой проволоки под углом 40° к оси вращения круга. Шаг между рядами обеспечивал перекрытие контакта двух смежных термоэлектродов. Перекрытие двух смежных рядов обеспечило непрерывность контакта термоэлектродов с деталью. Концы термоэлектродов 2 припаивались к медной прокладке. Сигнал с термоэлектродов через токосъемник 3 регистрировался на осциллографе 4.

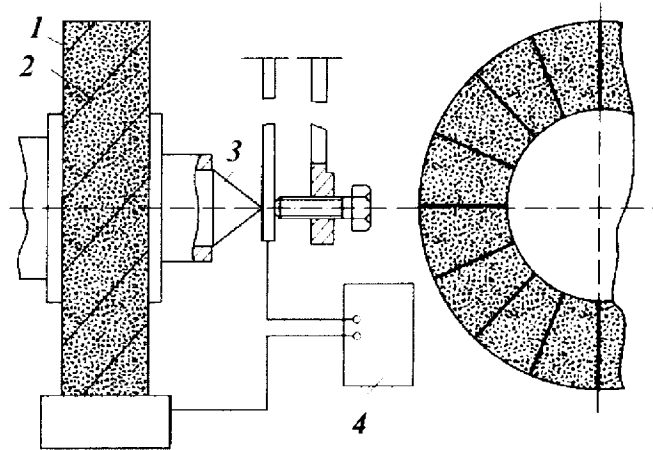


Рис.5.32. Шлифовальный круг с наклонными витками нихромовой проволоки

На осциллограмме четко просматривается область теплового насыщения (участок АВ) (рис.5.31). Записанная на этой же осциллограмме постоянная частота 250 Гц позволяет судить о времени теплового насыщения. При шлифовании машиноподелочных сталей период теплового насыщения изменяется от 0,01 до 0,03 с.

Время одного оборота шлифовального круга при частотах вращения шпинделя, например, равных 2800 – 3000 об/мин, имеет такой же порядок ($\frac{1}{47} \dots \frac{1}{50}$, с), что и период теплового насыщения.

Следовательно, для достижения предельного состояния температурного поля (теплового насыщения) шлифовальный круг должен сделать только один полный оборот. Скорость вращения шлифовального круга примерно в 100 раз больше скорости движения детали. При этих условиях под каждой элементарной площадкой поверхности детали круг обязательно сделает полный оборот. Следовательно, процесс шлифования при данных соотношениях скоростей круга и детали протекает с максимальной тепловой напряженностью. Если длительность нагрева элементарной площадки на поверхности детали будет меньше времени достижения теплового насыщения, то температура в зоне контакта не достигает своего максимального значения и может быть ограничена. Ограничение температуры может быть обеспечено путем периодического возобновления и прерывания процесса нагрева, пока температура поверхности не достигла максимального критического значения.

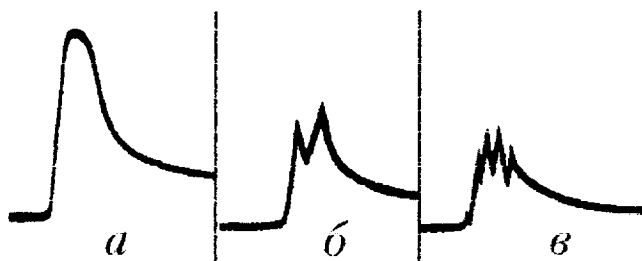


Рис.5.33. Осциллограмма изменения температуры при шлифовании кругами: *а* – сплошным; *б* – прерывистым с 20 вырезами; *в* – прерывистым с 25 вырезами

Такой нестационарный тепловой режим шлифования открывает принципиально новую возможность управления температурой в зоне контакта за счет периодического прерывания процесса шлифования.

На рис.5.33 представлены осциллограммы температуры поверхности при шлифовании деталей из стали 12Х2Н4А сплошным и прерывистым кругами.

Температура определялась полуискусственной термопарой нихром-сталь методом шлифования микротермопары. Из анализа осциллограмм видно, что температура поверхности при шлифовании прерывистым кругом снижается примерно на 30 – 40%.

5.11.2. Эффективность процесса прерывистого шлифования

Проблема повышения качества поверхностного слоя достигается путем электрофизико-химических эффектов, воздействующих на абразивный материал или применения прерывистых кругов.

Главное достоинство первого направления – эффективная правка круга в процессе самого процесса шлифования.

Достоинство второго направления: правка шлифовального круга и наличие эффекта прерывистости. Эффективная правка обеспечивает поддержание острого режущего рельефа круга во времени. Прерывание процесса резания снижает температуру в зоне резания, возбуждает высокочастотные колебания в упругой системе, изменяет баланс тепла между стружкой и деталью.

При прерывистом шлифовании уменьшение температуры происходит по двум каналам: за счет прерывания процесса резания до того момента, пока температура не достигла квазистационарного состояния, и за счет создания острого режущего рельефа на круге. Ни один из известных процессов шлифования не обладает двойным эффектом.

При шлифовании прерывистыми кругами припуск удаляется отдельными слоями. На рис.5.34 показана схема удаления припуска отдельными режущими выступами прерывистого круга.

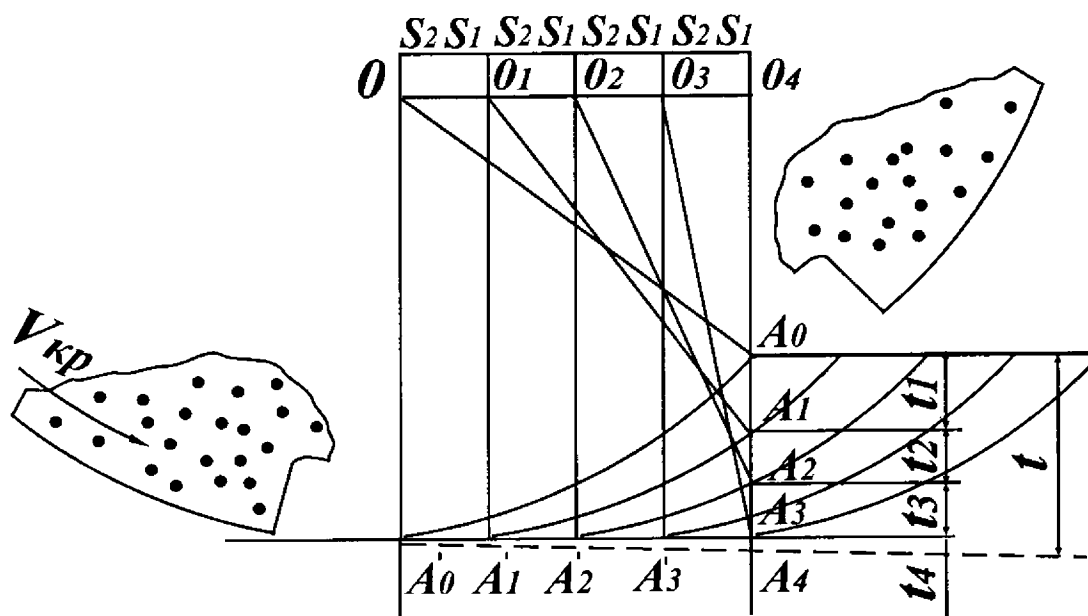


Рис. 5.34. Схема послойного удаления припуска

Число режущих выступов, проходящих над каждой точкой шлифуемой поверхности за период прохождения зоны контакта, определяется по формуле

$$n = \frac{\sqrt{Dt} V_{кр}}{V_d (l_1 + l_2)}, \quad (5.13)$$

где D – диаметр шлифовального круга; t – глубина шлифования; $V_{кр}$ – скорость круга; V_d – скорость детали; l_1 – длина режущего выступа; l_2 – длина пазов между выступами.

Для исследования тепловых явлений при прерывистом шлифовании рассмотрим следующую расчетную схему. Тепловой источник с переменной интенсивностью q_i перемещается по адиабатическому стержню A_0A_4 (рис. 5.34), дискретно перерезая его. Для этих условий тепловая схема описывается одномерным дифференциальным уравнением теплопроводности

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (5.14)$$

при начальных и граничных условиях:

$$T(x, \tau) \Big|_{\tau=0} = T_0; \quad T(x, \tau) \Big|_{x=0} = T_u; \quad \frac{\partial T(x, \tau)}{\partial x} \Big|_{x=\infty} = 0,$$

решение дифференциального уравнения имеет вид

$$T = 2q \sqrt{\frac{\tau}{c\rho\lambda}} \operatorname{ierfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{a\tau}}\right), \quad (5.15)$$

где T_0 – начальная температура детали, равная температуре среды; T_u – температура теплового источника на срезе адиабатического стержня °C; c – теплоемкость обрабатываемого материала, (Дж/кг·°C); ρ – плотность обрабатываемого материала, кг/м³; λ – коэффициент теплопроводности, Дж/(м·с·°C); a – коэффициент температуропроводности, $a = \frac{\lambda}{c\rho}$.

Для математического описания тепловых процессов, протекающих в зоне контакта прерывистого круга, рассмотрим схему, представленную на рис.5.35. Для формирования теплового импульса применим принцип суперпозиции, т. е. сместив начало координат в направлении оси x на величину $x_1 = \frac{l_1}{V_{кр}}$, соответствующую времени

работы режущего выступа, приложим к поверхности отрицательный (мнимый) тепловой источник.

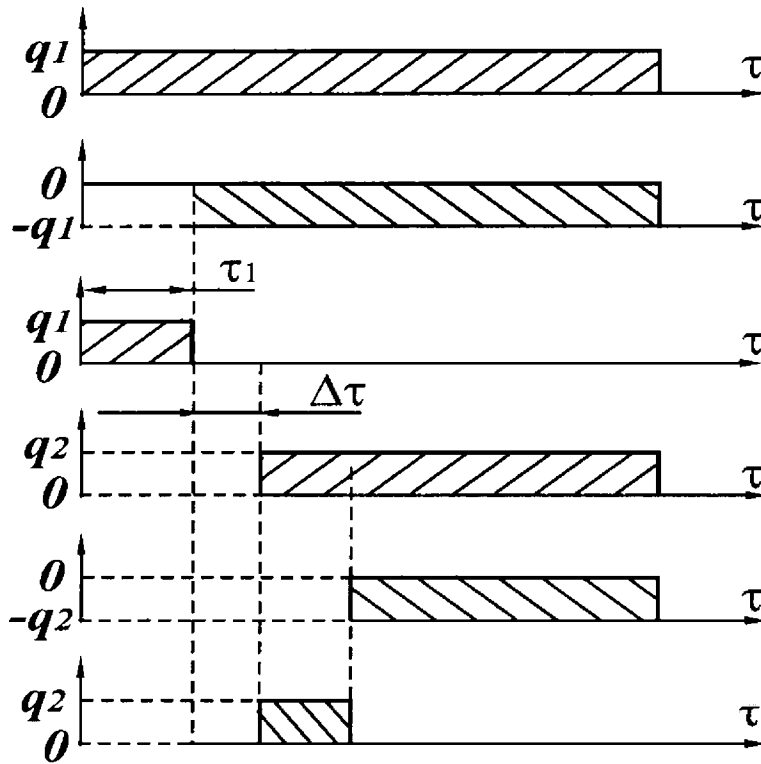


Рис.5.35. Формирование тепловых импульсов от работы отдельных режущих выступов прерывистого круга

Используя принцип суперпозиции, выведено уравнение для расчета температуры на поверхности, т. е. в точке A_4 , (рис. 5.34)

$$T = \frac{2}{\sqrt{c\rho\lambda}} \sum_{i=1}^n q_i \left[\sqrt{i \frac{l_1}{V_{kp}} + (i-1) \frac{l_2}{V_{kp}}} \cdot \operatorname{ierfc} \left(\frac{t - \sum_{i=1}^n t_i}{2\sqrt{a} \sqrt{i \frac{l_1}{V_{kp}} + (i-1) \frac{l_2}{V_{kp}}}} \right) - \right. \\ \left. - \sqrt{(i-1) \frac{(l_1 + l_2)}{V_{kp}}} \cdot \operatorname{ierfc} \left(\frac{t - \sum_{i=1}^n t_i}{2\sqrt{a} \sqrt{(i-1) \frac{(l_1 + l_2)}{V_{kp}}}} \right) \right], \quad (5.16)$$

где c , ρ , λ – теплоемкость, плотность, теплопроводность обрабатываемого материала соответственно; l_1 , l_2 – длина режущего выступа и длина выреза соответственно; t_i – толщины срезаемых слоев отдельными режущими выступами.

Они определяются из выражений

$$t_i = \begin{cases} \sqrt{R_{kp}^2 - \left(\sqrt{D \cdot t} - i \frac{V_d}{V_{kp}} (l_1 + l_2) \right)^2} - \sqrt{R_{kp}^2 - D \cdot t}, & \text{если } i=1 \\ \sqrt{R_{kp}^2 - \left(\sqrt{D \cdot t} - i \frac{V_d}{V_{kp}} (l_1 + l_2) \right)^2} - \left(\sqrt{R_{kp}^2 - D \cdot t} - \sum_{j=1}^{i-1} t_j \right), & \text{если } i \geq 2 \end{cases} \quad (5.17)$$

q_i – плотность теплового контакта на срезе пропорциональна силе резания F_{Z_i} . В свою очередь, сила резания пропорциональна глубине резания $t_i^{0,855}$ ($F_{Z_i} \equiv t_i^{0,855}$). Следовательно, $q_i \equiv t_i^{0,855}$,

$$ierfc u = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \exp(-u^2) - u \operatorname{erfc} u,$$

$$\operatorname{erfc} u = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_u^{\infty} \exp(-t^2) dt.$$

(см. таблицу приложения №15.)

Для оценки степени снижения температуры шлифования при прерывистом шлифовании были произведены расчеты температур. Исходные данные для расчета: сталь 12Х2Н4А ($\lambda=16,7$ Вт/(м²·°С); $a = 3 \cdot 10^{-6}$ м/с) $l_1 = 30$ мм; $l_2 = 22,4$ мм.

Режимы шлифования: $V_{kp} = 30$ м/с; $t = 0,015$ мм; $V_d = 5$ м/мин.

В табл. 5.8 представлены расчетные значения температур, возникающих на глубине срезаемого припуска t по мере удаления слоев с адиабатического стержня A_0A_4 (рис. 5.34) различными режущими выступами. Степень понижения температуры $L = \left(1 - T_{пр} / T_{спл} \right) \cdot 100$ при прерывистом шлифовании колеблется в пределах 22 – 30%.

Таблица 5.8

№ слоя	Глубина срезаемого слоя t_i , м	$T_{\text{спл}}$ °C сплошной круг	$T_{\text{пр}}$ °C прерывистый круг	Степень понижения температуры
1	$2,40 \cdot 10^{-6}$	295,7	230,9	21,9
2	$2,20 \cdot 10^{-6}$	433,5	321,4	25,8
3	$1,99 \cdot 10^{-6}$	526,6	384,2	27,0
4	$1,78 \cdot 10^{-6}$	597,6	432,7	27,6
5	$1,58 \cdot 10^{-6}$	654,5	470,4	28,1
6	$1,40 \cdot 10^{-6}$	698,8	498,5	28,7
7	$1,20 \cdot 10^{-6}$	733,1	519,6	29,1
8	$0,93 \cdot 10^{-6}$	755,9	533,4	29,4
9	$0,72 \cdot 10^{-6}$	767,4	538,6	29,8
10	$0,51 \cdot 10^{-6}$	767,3	534,9	30,3
11	$0,29 \cdot 10^{-6}$	750,0	518,6	30,9
12	$0,09 \cdot 10^{-6}$	702,4	479,8	31,7

На рис.5.36 показаны осциллограммы температур при сплошном (а) и прерывистом (б) шлифовании, полученные при скорости развертки луча осциллографа $9,6 \cdot 10^{-3}$ с/см и $1,2 \cdot 10^{-3}$ с/см. Величины температурных всплесков на осциллограмме пропорциональны глубинам срезаемых слоев t_i (рис.5.34).

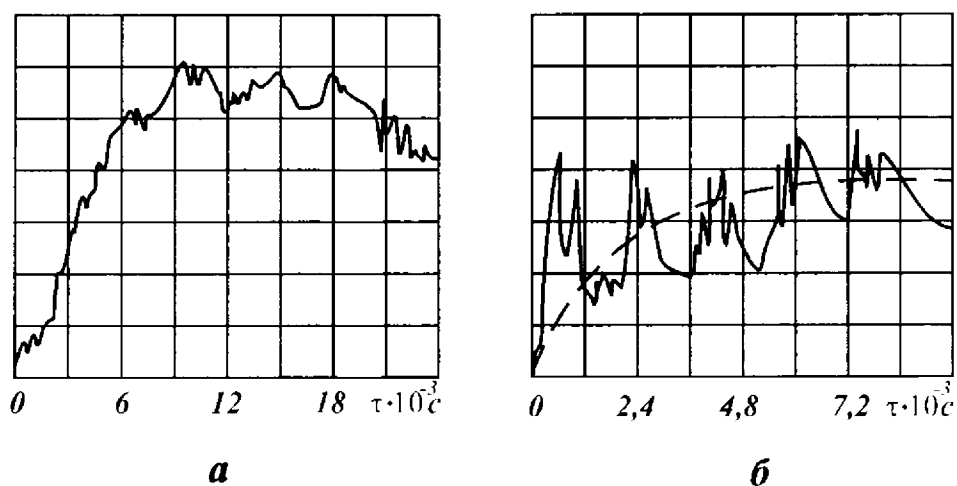


Рис. 5.36. Осциллограммы изменения температуры на плоскости среза при обычном а и прерывистом б шлифовании ($l_1 = 30$ мм, $l_2 = 22,4$ мм, $V_{кр} = 30$ м/с, $V_{д} = 5$ м/мин)

5.11.3. Режущая способность прерывистых кругов

Режущая способность прерывистых кругов оценивается по величине коэффициента шлифования F_z/F_y , работе, затраченной на удаление единицы объема материала, $A_{уд}$ (Дж/мм³), и удельному объему металла, снимаемому в единицу времени K (мм³/(с·н)).

На рис.5.37 представлены кривые изменения параметров, характеризующих режущую способность сплошных и прерывистых ($l_1=3,6$ мм; $l_2=2,4$ мм) шлифовальных кругов 24A25CM16K5 от времени.

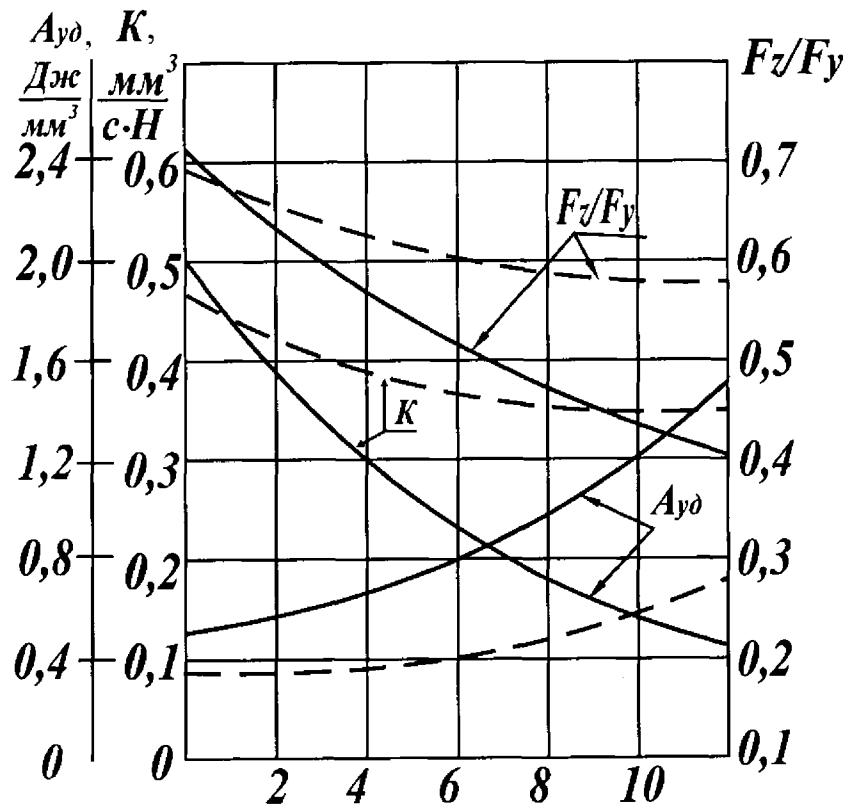


Рис.5.37. Зависимость удельной работы шлифования $A_{уд}$, удельного съема металла K и коэффициента шлифования F_z/F_y от времени.

Контурные линии – сплошной круг, пунктирные – прерывистый

За двенадцатиминутный период шлифования стали X12M на режиме ($V_{кр} = 34,5$ м/с; $V_{д} = 0,1$ м/с; $S_{поп} = 0$; $F_y = 1,2$ н/мм) сплошным кругом 24A25CM16K5 удельная работа шлифования увеличилась в 3,4 раза, т. е. от 0,45 до 1,5 Дж/мм³. После 12-минутного периода шлифования прерывистым кругом удельная работа шлифования возросла от 0,38 до 0,6 Дж/мм³. Удельный съем металла при

шлифовании сплошным и прерывистым кругами уменьшился от 0,5 до 0,1 мм³/(с·н) и от 0,45 до 0,35 мм³/(с·н) соответственно.

Коэффициент шлифования F_z/F_y за исследуемый период обработки сплошным кругом уменьшился от 0,72 до 0,4, а после шлифования прерывистым кругом остался почти неизменным.

Из приведенных данных видно, что прерывистые круги сохраняют более длительное время хорошую режущую способность.

В первоначальный период времени работы прерывистого круга, условия работы режущих зерен почти не отличаются от обычного шлифования, если не считать, что за счет вырезов уменьшается общее количество зерен и, соответственно, возрастает нагрузка на них. Сила удара, воспринимаемая в основном зернами, расположенными в зоне, прилегающей к передней кромке режущего выступа, вызывает их интенсивное разрушение и выкрашивание из связки. По мере износа прерывистого круга производится самообразование профиля, т. е. на режущих выступах формируются фронтальные поверхности, имеющие некоторый угол атаки к плоскости резания.

Следует отметить, что оформление фронтальной поверхности коренным образом изменяет условия удаления припуска. После полного самообразования профиля режущие выступы сохраняют длительное время стабильную работу режущих зерен. Самозатачивание круга протекает равномерно по всему профилю с сохранением постоянного угла атаки. Происходит стабилизация режущей способности круга. Режущие зерна на сформировавшемся профиле круга располагаются на разных радиусах от центра вращения круга и зерна, перемещаясь по концентрическим окружностям, удаляют общий припуск отдельными тонкими слоями. При такой схеме удаления припуска изменяется баланс тепла, идущего в стружку и обрабатываемую деталь.

На рис. 5.38 представлена схема удаления припуска отдельными тонкими слоями. Режущие зерна, расположенные в зоне, прилегающей к передней кромке режущего выступа, срезают верхний слой металла. Выделившееся тепло Q_2 стремится распространиться в глубинные слои металла. Но это тепло не успевает проникнуть на глубину срезаемого припуска t , так как следующая группа зерен, расположенных на большем радиусе режущего выступа, срезает разогретый слой, унося большую долю тепла со стружкой Q_1 .

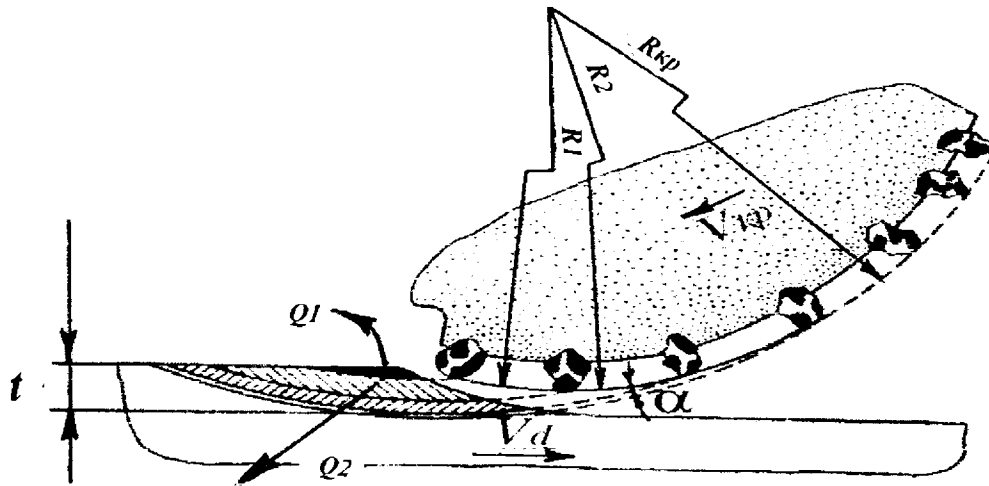


Рис. 5.38. Баланс тепла при прерывистом шлифовании

При прерывистом шлифовании количество тепла, поглощаемое деталью, на 50% меньше по сравнению с обычным шлифованием.

5.11.4. Методика расчета геометрических параметров прерывистых кругов

Первоначально необходимо выбрать степень понижения температуры, обеспечивающую протекание процесса шлифования без прижогов и трещин. Этот параметр характеризует отношение максимальных температур при прерывистом $\theta_{\text{п}}^*$ и при сплошном $\theta_{\text{с}}^*$ шлифовании $p = \theta_{\text{п}}^* / \theta_{\text{с}}^*$. Практика использования прерывистых кругов на машиностроительных заводах показывает, что для обеспечения требуемой размерной стойкости длина режущих выступов l_1 должна быть больше длины паза l_2 . Принимая это положение за основу, проведена аппроксимация зависимостей $\theta^* = \theta^*(Fo_1, v)$ и построены графики (рис. 5.39) безразмерного комплекса $Fo_1 = \alpha\tau/h^2$, определяющего время τ_1 работы режущего выступа, от отношения $v = l_2/l_1$ в интервале изменения безразмерного параметра u от 1 до 150 при трех значениях коэффициента p . В результате обработки данных получена общая структурная формула

$$Fo_1 = \frac{v - v_0}{A + Bu}, \quad (5.18)$$

где v_0, A, B – постоянные величины, зависящие от безразмерного параметра u и коэффициента понижения температуры p (табл.5.9).

Т а б л и ц а 5.9. Значения постоянных коэффициентов

Коэффициент понижения температуры p	$1 < u \leq 15$			$15 < u \leq 90$			$90 < u \leq 150$		
	A	B	v_0	A	B	v_0	A	B	v_0
0,8	1	0,32	0,25	1	0,32	0,27	1	0,32	0,28
0,7	4	0,75	0,44	4	0,75	0,48	4	0,75	0,52
0,6	5	1,70	0,68	5	1,70	0,71	5	1,70	0,74

Участок $1 < u \leq 15$ соответствует малым скоростям перемещения зоны контакта. Например, при $h = 1,5 \cdot 10^{-3}$ м, $a = 6 \cdot 10^{-6}$ м²/с, $u = 1$ и $u = 15$ скорости перемещения соответственно равны 0,004 и 0,005 м/с.

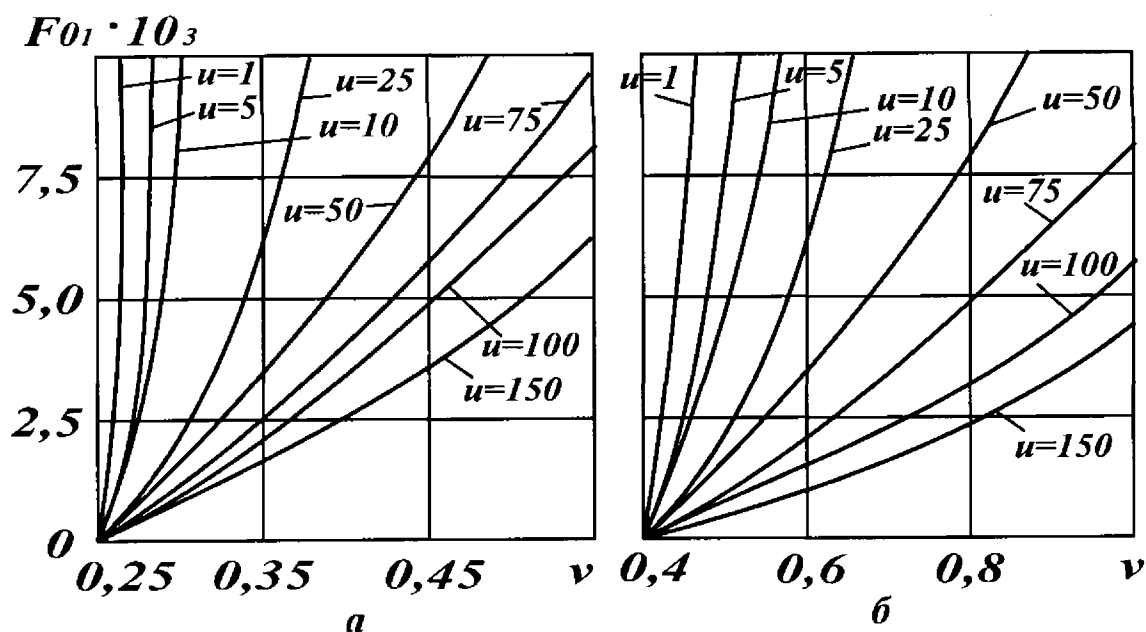


Рис.5.39. Зависимость безразмерного времени Fo от отношения v для различных безразмерных скоростей U : a – степень понижения температуры 20% ($P=0,8$); b – степень понижения температуры 30% ($P=0,7$)

Последующие участки захватывают диапазоны изменения скоростей источника тепла от 0,05 до 0,33 м/с и от 0,33 до 0,66 м/с. При $v = v_0$ формула (5.18) теряет смысл, т. е. в этом случае ни при каком Fo_1 не будет понижаться температура в зоне контакта от прерывания процесса шлифования. Для расчета геометрических параметров прерывистых кругов необходимо иметь следующие исходные данные:

скорость V_d перемещения детали; глубину шлифования t ; диаметр круга d ; теплофизические константы обрабатываемого материала – теплопроводность λ , теплоемкость c , плотность γ .

Рассмотрим порядок расчета геометрических параметров кругов с прерывистой поверхностью.

1. Определяем безразмерный параметр скорости $u = V_d h / a$.

Для плоского шлифования периферией круга $h = 0,5\sqrt{dt}$.

2. Задаваясь требуемой степенью понижения температуры, из табл. 5.9 находим значения коэффициентов $v_0 < v$. Отношение выбираем из условия $v_0 < v \leq 1$.

3. По формуле (5.18) вычисляем критерий Фурье F_{0_1} , а по формулам $l_1 = h^2 / a \cdot V_{кр} F_{0_1}$; $l_2 = v l_1$ ($V_{кр}$ – скорость периферии круга) находим параметры прерывистого круга.

Для уменьшения дисбаланса шлифовального круга число режущих выступов рекомендуется делать четным. С этой целью необходима корректировка расчетных величин $l_1 + l_2$ с выполнением условия

вия $z = \frac{\pi d_{кр}}{l_1 + l_2}$, целое четное число выступов круга, равное 4, 6, 8...

Пример 1. Режим обработки $V_d = 0,2$ м/с; $h = 1,5 \cdot 10^{-3}$ м; $V_{кр} = 30$ м/с; материал сталь X12M ($a = 6 \cdot 10^{-6}$ м²/с).

Требуется определить геометрические параметры круга с прерывистой поверхностью, который должен за счет прерывания процесса до того момента, пока не произошло тепловое насыщение, уменьшить температуру по сравнению с процессом шлифования сплошным кругом на 30% ($p = 0,7$).

Решение:

1. Определяем безразмерную скорость перемещения детали

$$u = \frac{V_d h}{a} = \frac{0,2 \cdot 1,5 \cdot 10^{-3}}{6 \cdot 10^{-6}} = 50.$$

2. В формулу (5.18) подставляем постоянные коэффициенты A, B и v_0 (из табл.5.9), соответствующие заданной степени понижения температуры $p = 0,7$ и рассчитанной по формуле (5.18) безразмерной скорости $u = 50$

$$Fo_1 = \frac{v - 0,48}{4 + 0,75 \cdot 50}. \quad (5.19)$$

Отношение $v = l_1/l_2$ для данного случая может изменяться от 0,5 до 1,0. В указанном интервале значений v можно получить большое многообразие прерывистых кругов, из которых все они обеспечивают постоянную степень понижения температуры $p = 0,7$.

С учетом размерной стойкости круга рекомендуется выбирать этот параметр минимальным. Принимая $v = 0,65$, получим

$$Fo_1 = \frac{0,65 - 0,48}{4 + 0,75 \cdot 50} = 4,0 \cdot 10^{-3},$$

$$l_1 = \frac{h^2 V_{кр}}{a} \cdot Fo_1 = \frac{2,25 \cdot 10^{-6}}{6 \cdot 10^{-6}} \cdot 30 \cdot 4,0 \cdot 10^{-3} = 45 \text{ мм},$$

$$l_2 = l_1 v = 45 \cdot 0,65 = 29 \text{ мм}.$$

3. Определяем количество режущих выступов для круга

$$z = \frac{\pi d_{кр}}{l_1 + l_2} = \frac{3,14 \cdot 250}{45 + 29} = 10,6.$$

Принимая $z = 10$, производим корректировку геометрических параметров прерывистого круга $l_1 = 48,5$ мм; $l_2 = 30$ мм.

Пример 2. Шлифуется деталь из стали 12Х2Н4А ($a = 4 \cdot 10^{-6}$ м²/с), полуширина теплового источника $h = 1,5 \cdot 10^{-3}$ м; $V_{кр} = 30$ м/с, скорости перемещения теплового источника $V_{д} = 0,083$ м/с; 0,166 м/с; 0,249 м/с.

Решение.

1. Определяем безразмерные параметры скорости по формуле [8]: $u_1 = 31$; $u_2 = 62$; $u_3 = 93$.

2. Для коэффициента понижения температуры $p = 0,6$ и $u_1 = 31$ и $u_2 = 62$ формула для расчета критерия Fo_1 имеет вид

$$Fo_1 = \frac{v - 0,71}{5 + 1,7u}.$$

Принимая $v = 0,8$, получим следующие величины режущих выступов: $l_{1,1} = 27$ мм; $l_{1,2} = 13,8$ мм и соответственно впадин $l_{2,1} = 21,6$ мм; $l_{2,2} = 11$ мм. Для коэффициента понижения температуры $p = 0,6$ и $u_3 = 93$ формула для расчета критерия Fo_1 имеет вид

$$Fo_1 = \frac{v - 0,74}{5 + 1,7u}$$

Принимая $v = 0,86$, получим следующие величины режущих выступов: $l_{1,3} = 6,2$ мм; $l_{2,3} = 4,9$ мм. С увеличением скорости перемещения теплового источника от 0,083 до 0,249 м/с протяженность режущих выступов и впадин прерывистых кругов, обеспечивающих одинаковую степень понижения температуры $p = 0,6$, как показывают расчеты, уменьшается от $l_{1,1} = 27$ мм; $l_{2,1} = 21,6$ мм до $l_{1,3} = 6,2$ мм; $l_{2,3} = 4,9$ мм.

5.11.5. Условия возникновения параметрического резонанса и определение областей неустойчивости работы упругой системы станка ЗГ71

Периодичность изменения возмущающей силы в режиме прерывистого шлифования приводит к изменению жесткости упругой системы по времени (рис. 5.40).

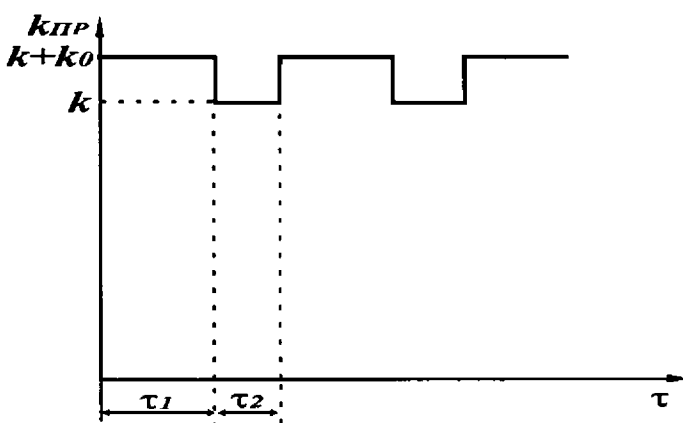


Рис.5.40. Изменение жесткости упругой системы плоскошлифовального станка при прерывистом шлифовании

В момент контакта режущего выступа с обрабатываемой деталью жесткость упругой системы равна $k + k_0$, а в момент разрыва, процесса резания — k . Жесткость k характеризует свойства упругой системы станка в разомкнутом состоянии и определяется его конструкцией, а также условиями сопряжения его элементов.

Статическая жесткость резания $k_0 = k \cdot \left(\frac{t_{\text{л}}}{t} - 1 \right)$,

где $t_{\text{л}}$ – заданная по лимбу станка глубина резания; t – истинный сьем металла.

Соответствующие колебания называют параметрически возбуждающими. Опасность представляют колебания с возрастающими амплитудами. Они приводят к параметрическому резонансу.

Установлено, что чем больше интервал изменения жесткости, тем шире область неустойчивых режимов шлифования. Для выявления потенциально возможных областей возникновения параметрического резонанса рассмотрим одномассовую систему в установившемся режиме.

При прерывистом шлифовании движение системы описывается уравнением

$$m\ddot{y} + b\dot{y} + ky = (F - k'_0 y)f(\tau), \quad (5.20)$$

$$\text{где } f(\tau) = \begin{cases} 1, & \text{если } 0 < \tau < \tau_1 \\ 0, & \text{если } \tau_1 < \tau < (\tau_1 + \tau_2) \end{cases}.$$

Дифференциальные уравнения движения системы в период контакта выступа с обрабатываемой деталью и разрыва процесса резания имеют вид

$$\begin{cases} m_{\text{пр}}\ddot{y}_1 + by_1 + ky = -k_0 y_1 \\ m_{\text{пр}}\ddot{y}_2 + by_2 + ky = 0 \end{cases}. \quad (5.21)$$

Таким образом, движение системы описывается двумя уравнениями с различными коэффициентами при координате y . В данном случае переменный коэффициент при координате y изменяется по закону прямоугольного импульса (рис.5.40) с периодом $\tau_1 + \tau_2$.

В течение времени $\tau_1 + \tau_2$ уравнения имеют постоянные коэффициенты, поэтому можно воспользоваться способом припасовывания. Решение системы уравнений (5.21) примет вид

$$\begin{cases} y_1 = e^{-\eta\tau} [A \sin(\omega_1\tau) + B \cos(\omega_1\tau)] \\ y_2 = e^{-\eta\tau} [C \sin(\omega_2\tau) + D \cos(\omega_2\tau)] \end{cases}, \quad (5.22)$$

где $\omega_1 = \sqrt{\frac{k+k_0}{m} - \eta^2}$; $\omega_2 = \sqrt{\frac{k}{m} - \eta^2}$; m – приведенная масса;

η – коэффициент затухания.

Для определенных постоянных A, B, C, D необходимо учесть граничные условия. Два условия отнесем к моменту времени τ_1

$$y_1(\tau_1) = y_2(\tau_2); \dot{y}_1(\tau_1) = \dot{y}_2(\tau_2), \quad (5.23)$$

два других условия – к моменту времени $(\tau_1 + \tau_2)$

$$\lambda_0 y_1(0) = y_2(\tau_1 + \tau_2); \lambda_0 \dot{y}_1(0) = \dot{y}_2(\tau_1 + \tau_2), \quad (5.24)$$

где λ_0 – некоторое постоянное число.

Если $|\lambda_0| > 1$, то колебания в каждом периоде усиливаются, а если $|\lambda_0| < 1$, то они будут постепенно затухать.

Таким образом, устойчивость системы определяется значением модуля λ_0 .

После подстановки в выражение (5.22) условий (5.23) и (5.24) и решения системы однородных уравнений относительно постоянных A, B, C, D получим следующее квадратное уравнение

$$\lambda_0^2 - 2L\lambda_0 + M = 0,$$

где

$$L = \frac{1}{2} e^{-\eta(\tau_1 + \tau_2)} \left[\frac{\omega_1^2 + \omega_2^2}{\omega_1 \omega_2} \sin(\omega_1 \tau_1) \sin(\omega_2 \tau_2) - 2 \cos(\omega_1 \tau_1) \cos(\omega_2 \tau_2) \right];$$

$$M = e^{-2\eta(\tau_1 + \tau_2)}.$$

Корни этого уравнения

$$\lambda_{0,1,2} = L \pm \sqrt{L^2 - M}.$$

Для того, чтобы $\lambda_{0,1}$ и $\lambda_{0,2}$ были действительными, должно соблюдаться неравенство $L^2 > M$. Условие неустойчивости $|\lambda_0| > 1$ можно записать как $|L| > 1 + M/2$.

Области неустойчивости упругой системы станка 3Г71 определяются геометрическими параметрами прерывистого круга, динамическими характеристиками упругой системы и численным значением жесткости резания k'_0 . Области неустойчивой работы упругой системы станка при шлифовании прерывистыми кругами представлены на рис.5.41.

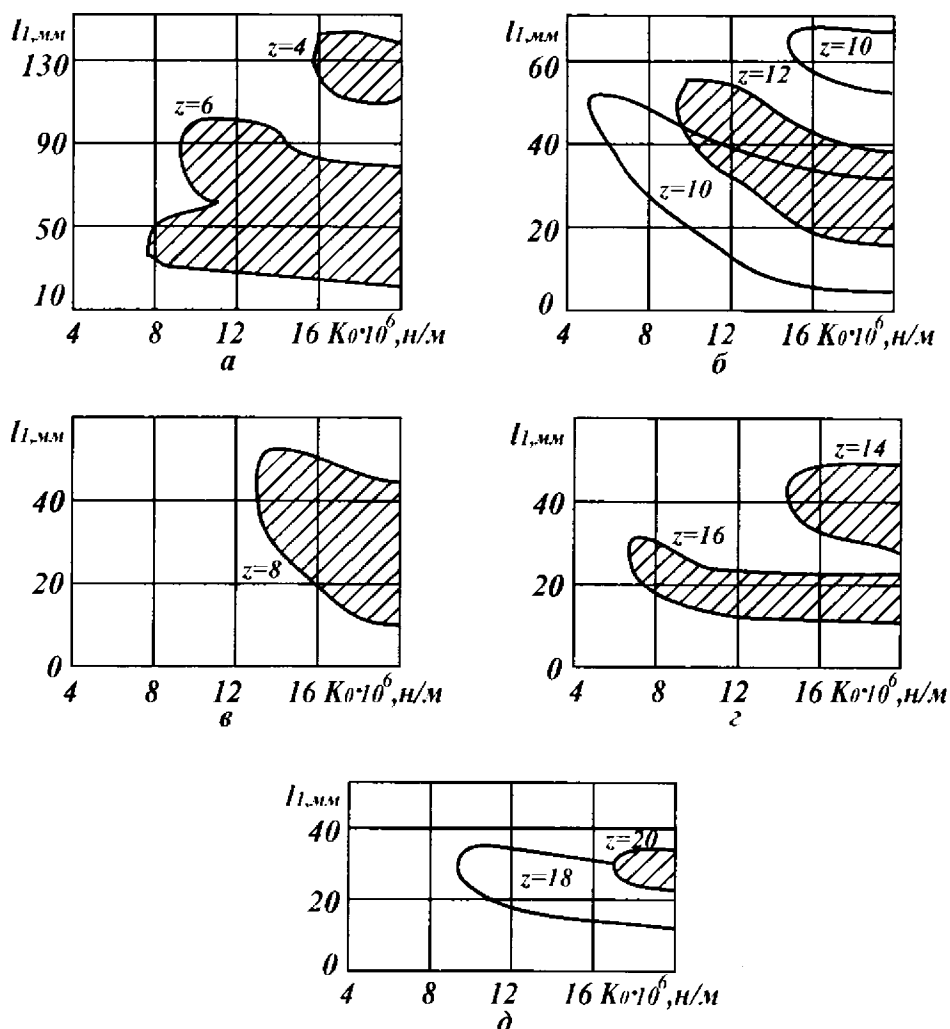


Рис. 5.41. Области неустойчивой работы упругой системы плоскошлифовального станка 3Г71 при различных z :
 (а) $z=4...6$; (б) $z=8$; в- $z=10...12$; (г) $z=14...16$; (д) $z=18...20$

Приведенные данные позволяют оценивать прерывистые круги по динамической устойчивости. Оценка динамичности упругой системы станка на основании полученных областей неустойчивой работы упругой системы станка позволила рекомендовать применение на плоскошлифовальных станках кругов с числом режущих выступов [12, 14, 16, 18].

Зависимость l_1 (мм) от геометрических параметров прерывистых шлифовальных кругов с диаметром $d_{кр}=250$ мм и глубиной прорезки пазов 20–30 мм можно представить в следующем виде.

Т а б л и ц а 5.10

z	$v = 0,3$	$v = 0,5$	$v = 1,0$
12	50	44	32
14	42	38	28
16	38	34	25
18	34	30	–

Из анализа приведенных данных видно, что области неустойчивой работы упругой системы станка определяются геометрическими параметрами прерывистого круга. Большие амплитуды колебаний при прерывистом шлифовании вызывают существенное ухудшение качества поверхности. В связи с этим оптимизация геометрических параметров прерывистых кругов с целью устранения резонансных и неустойчивых режимов работы упругой системы станка является задачей первостепенной важности.

Известно, что для устранения резонансных условий работы прерывистых кругов необходимо обеспечить частоту импульсного воздействия ударов от режущих выступов прерывистых кругов в 1,1 раза больше резонансной. С учетом этого условия протяженность режущих выступов, исключающих возникновение ударного и параметрического резонанса [14], должна быть

$$l_1 = \frac{\pi d_{кр} n}{(3...4,6) \omega i_{\max}},$$

где $d_{кр}$ – диаметр шлифовального круга; n – частота вращения шпинделя шлифовального круга; ωi_{\max} максимальная частота изгибных колебаний спектра собственных колебаний упругой системы станка в направлении нормали к обрабатываемой детали. Указанный в формуле интервал (3...4,6) характеризует протяженность режущих выступов, обеспечивающих требуемое снижение температуры в зоне резания и высокую стойкость круга.

5.12. ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ СТАБИЛИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ

Проблема обеспечения заданного качества поверхностного слоя деталей при их обработке для каждого конкретного случая решается опытным путем – подбором условий обработки, которые не всегда оказываются достаточно производительными и экономичными. Экспериментальное решение указанной проблемы требует в каждом конкретном случае проведения самостоятельной научно-исследовательской работы, зачастую довольно трудоемкой. Дальнейшее развитие технологии изготовления деталей, повышение качества и производительности обработки возможно лишь на базе теории, описывающей основные закономерности динамической стабилизации технологических параметров с учетом кинетики формирования физико-механических свойств поверхностного слоя деталей. Такой подход позволяет осознанно управлять технологическими параметрами процесса с целью обеспечения заданного качества обработки при максимальной производительности.

Силовые и тепловые явления, а также износ инструмента определяют технологические возможности процесса обработки: обрабатываемость материалов, стойкость инструмента, производительность и экономичность обработки. Для обеспечения динамической стабилизации указанных параметров необходимо изучить контактные, силовые и тепловые процессы, а также явления, связанные с износом инструмента, которые формируют качество поверхностного слоя и определяют производительность и экономичность обработки. Необходимо также разработать способы их конструктивно-технологической реализации, обеспечивающие динамическую стабилизацию и расширяющие технологические возможности процесса обработки, и сформулировать и решить задачу оптимизации режимов шлифования по заданным характеристикам качества поверхностного слоя.

5.12.1. Проблема обеспечения динамической стабильности параметров процесса шлифования

В связи с повышением прочности обрабатываемых материалов, точности изготовления деталей и развитием методов получения точных заготовок объем абразивной обработки непрерывно увеличивается-

ся. В отдельных видах производств на операции шлифования приходится до 60% от общей трудоемкости механообработки [68].

Процесс шлифования сопровождается большим количеством взаимосвязанных или независимых явлений, к числу которых относятся:

- непостоянство физико-механических свойств абразивных материалов, например, микротвердость электрокорунда нормального изменяется в пределах 18000 – 25000 МПа, электрокорунда белого 19000 – 29000 МПа, монокорунда 21000 – 28000 МПа, карбида кремния зеленого 25000 – 37000 МПа, кубического нитрида бора 73000 – 100000 МПа;

- большое разнообразие форм и размеров абразивных зерен на рабочей поверхности шлифовального круга;

- разброс физико-механических свойств связки инструмента;

- различие коэффициентов термического расширения зерен в различных кристаллографических плоскостях;

- случайный характер размеров пор и их распределение в объеме шлифовального круга.

Указанные несовершенства создают неоднородный температурно-силовой режим в микрообъемах зоны шлифования, изменяющийся во времени.

Шлифовальный круг надо рассматривать как главный возмущающий фактор процесса шлифования, стабильность работы которого предопределяет стабильность протекания процесса резания. Стойкость шлифовального круга становится лимитирующим параметром при определении времени безотказной работы всей технологической системы.

Работа шлифовального круга в режиме самозатачивания обеспечивает наиболее стабильные условия протекания процесса обработки. При этом производительность, сила и температура резания сохраняются практически постоянными на протяжении всего периода обработки.

Однако более распространенным случаем является работа круга в режиме частичного затупления, при котором нарушаются условия стационарности и стабильности процесса шлифования.

Рельеф круга, полученный после правки, изменяется за период шлифования. В процессе работы круга зерна вырываются из связки, увеличивается расстояние между зернами, на вершинах зерен появ-

ляются площадки износа. Расстояние между режущими зернами является параметром, характеризующим динамику изменения рельефа круга с учетом одновременно протекающих процессов самозатачивания и затупления зерен круга. Изменение рельефа во времени хорошо аппроксимируется выражением [69, 70]

$$\delta(\tau) = \delta_0 \exp(k\tau + c\tau^2), \quad (5.25)$$

где δ_0 – расстояние между зернами после правки круга; τ – время шлифования; k, c – коэффициенты самозатачивания и затупления круга соответственно.

В процессе шлифования изменяется также другой важный параметр рельефа – относительная опорная длина профиля круга η_p . С течением времени она возрастает

$$\eta_p = \eta_0 \exp(\alpha\tau^2), \quad (5.26)$$

где η_0 – относительная опорная длина профиля круга после правки; τ – время шлифования (мин); α – коэффициент $\alpha \approx 10^{-3}$.

Увеличение η_p за время шлифования происходит за счет двух одновременно протекающих процессов: затупления и появления новых режущих зерен. Следует заметить, что оба фактора вызывают увеличение η_p , но их влияние различно [70].

Процессы затупления зерен и самозатачивания круга существенно зависят от возникновения вибраций [71, 72].

В работе [71] утверждается, что вибрации, возникающие при шлифовании, оказывают вредное влияние на точность и качество поверхности детали, а также уменьшают стойкость инструмента.

В работах [72, 73], наоборот, установлено, что применение резания с вибрациями на оптимальных режимах повышает обрабатываемость и уменьшает интенсивность износа инструмента.

Однако следует заметить, что имеющаяся информация по использованию вибраций при шлифовании малочисленна, разобщена и не позволяет разработать конкретные рекомендации по управлению процессом. С появлением многооперационных станков с ЧПУ проблема повышения динамической устойчивости процесса шлифования становится исключительно актуальной. Повышение эффективности

процесса шлифования во многом зависит от оптимизации процесса и повышения качества абразивного инструмента.

Разработка способов стабилизации технологических параметров и ее практическая реализация позволяют производить расчет технологических характеристик и режимов обработки с учетом обеспечения требуемых параметров качества при минимальных затратах, а также осуществлять оптимальное управление режимами обработки. Параметры, которые определяют протекание процесса резания при шлифовании, можно разделить на входные, функциональные и выходные.

Стабильность выходных параметров (производительность, экономичность процесса резания, точность обработки и качество поверхности) зависит от стабильности функциональных параметров (сила резания, температура, режущая способность круга во времени). Величина и характер рассеяния этих параметров определяется интенсивностью и стабильностью физико-химических явлений, протекающих в зоне обработки. Стабилизация одного из функциональных параметров или их набора в процессе обработки лежит в основе адаптивного управления процессом шлифования [74].

Силы шлифования возникают от работы деформации и трения, совершаемой всеми одновременно работающими абразивными зернами и связкой круга. В шлифовальном круге в результате разноразмерности зерен они разделяются на режущие, давящие и нережущие. По данным работы [75] при шлифовании число режущих зерен составляет 10% от общего количества выступающих из связки зерен, число давящих – 12% и нережущих – 78% [75].

Каждое режущее зерно проходит три последовательные стадии разрушения: поверхностное (вследствие истирания), микрообъемное (разрушение в пределах зерна) и макрообъемное (вырыв зерна из связки). В соответствии с этими стадиями разрушения зерен различают три режима работы круга: режим затупления, частичного самозатачивания (смешанный режим) и интенсивного осыпания (режим интенсивного самозатачивания). Размерный износ круга за период стойкости (за время между двумя правками) составляет 0,02–0,05 мм. Абразив расходуется в основном при правке круга [75].

При шлифовании процессы деформирования и теплообразования в зоне контакта протекают со скоростями значительно большими, чем при обработке лезвийными инструментами. При шлифовании деформирующий фактор значительно ослаблен по сравнению с теп-

ловым. Поэтому основной причиной теплообразования при шлифовании следует считать процессы трения, протекающие в зоне контакта инструмента и детали.

5.12.2. Влияние контактных явлений на динамическую нестабильность процесса шлифования

При шлифовании процессы деформирования и теплообразования представляют собой суперпозицию единичных воздействий от множества режущих зерен шлифовального круга. Математическое описание отдельных таких воздействий с последующим их суммированием приводит к чрезвычайно сложным математическим выражениям. Поэтому при моделировании зоны контакта круга и детали принимается усредненный по всем абразивным зернам источник деформационных и тепловых воздействий.

Процесс шлифования рассматривается как процесс резания множеством абразивных зерен, находящихся в плоскостях, проходящих через ось вращения круга. Причем расстояние между этими плоскостями (режущими контурами) на периферии круга равно среднему расстоянию между зернами l_{ϕ} (рис.5.42).

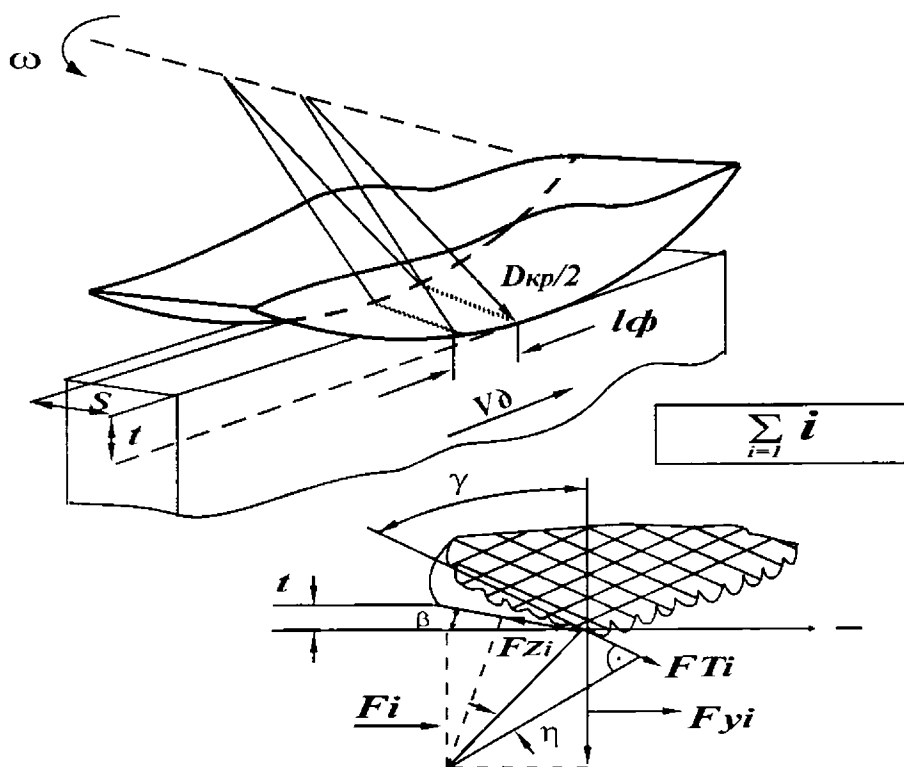


Рис. 5.42. Схема формирования режущей кромки обобщенного резца

В пределах некоторого участка рабочей поверхности круга режущие контуры абразивных зерен последовательно срезают металл, создавая эффект резания обобщенными резцами с прямолинейными режущими кромками.

Тангенциальная сила резания на единичном обобщенном резце может быть найдена из выражения [76]

$$F_{zi} = 0,185 H_v t S \cdot \varepsilon \frac{\xi \cos(\eta + \gamma)}{\xi \cos(\eta + \gamma) - \sin \eta}, \quad (5.27)$$

где H_v – твердость обрабатываемого материала по Виккерсу; t – глубина шлифования; S – ширина единичного резца; ξ – усадка стружки; η – угол трения скольжения; ε – относительный сдвиг; γ – передний угол единичного зерна.

Относительный сдвиг при резании единичным резцом с отрицательным передним углом γ согласно расчетной схеме (рис.5.43) находится из выражения $\varepsilon = \frac{\Delta S}{\Delta x}$,

$$\varepsilon = ctg\beta + tg(\beta + \gamma). \quad (5.28)$$

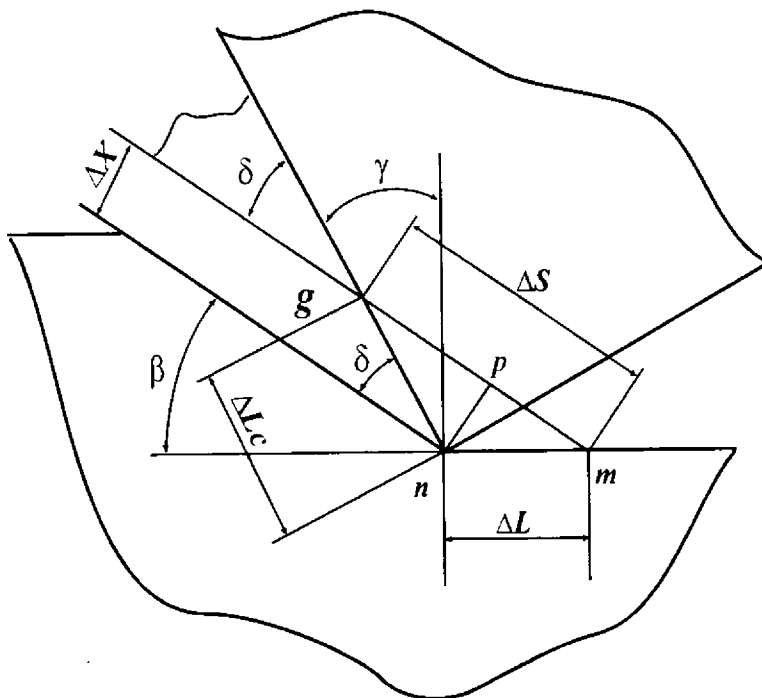


Рис. 5.43. Расчетная схема

После преобразований выражение (5.28) примет вид

$$\xi = \frac{\xi^2 + 2\xi \sin \gamma + 1}{\xi \cos \gamma}, \quad (5.29)$$

где ξ – усадка стружки, $\xi = \frac{\Delta L}{\Delta L_c}$.

Составляющие силы резания F_z и F_y при шлифовании абразивным кругом возникают от работы зерен обобщенного резца: $F_z = MF_{zi}$, где M – отношение числа контактирующих зерен в обобщенном резце N_0 к числу всех зерен N :

$$M = \frac{N_0}{N} = \frac{N_0 t_i}{t},$$

где t – глубина шлифования; t_i – толщина слоя, снимаемого одним обобщенным резцом.

Среднее расстояние между обобщенными резцами можно определить из выражения

$$l_\Phi = K_\delta d (d / y)^n, \quad (5.30)$$

где K_δ – параметр, зависящий от объемного строения стандартного абразивного инструмента и условий правки его рабочей поверхности; d – характерный размер абразивного зерна инструмента; y – расстояние от наиболее выступающего зерна на периферии круга до центра круга; n – показатель степени, зависящий от материала абразивных зерен, например, для электрокорундовых кругов на керамической связке ($n = 1,5$); для эльборовых на керамической связке ($n = 1$) [77].

Коэффициент K_δ , входящий в выражение (5.30), находится по формуле [77]

$$K_\delta = K_n \cdot K_{ск} \cdot K_{пр}, \quad (5.31)$$

где $K_n = \beta_n / \beta_c$; β_n – объемное содержание пор в абразивном круге; β_c – объемное содержание связки в абразивном круге; $K_{ск}$ – коэффициент структуры абразивного круга $K_{ск} = \frac{\beta_c}{\beta_3 n_m}$; β_3 – объемное содержание зерен в абразивном круге; n_m – максимальное число мос-

тиков связки на одно зерно; $K_{пр}$ – коэффициент правки рабочей поверхности круга.

На основании стандартных соотношений β_3 , β_c , β_{II} в абразивном круге построены номограммы для определения $K_{пр}$ и $K_{ск}$ (рис. 5.44 и 5.45).

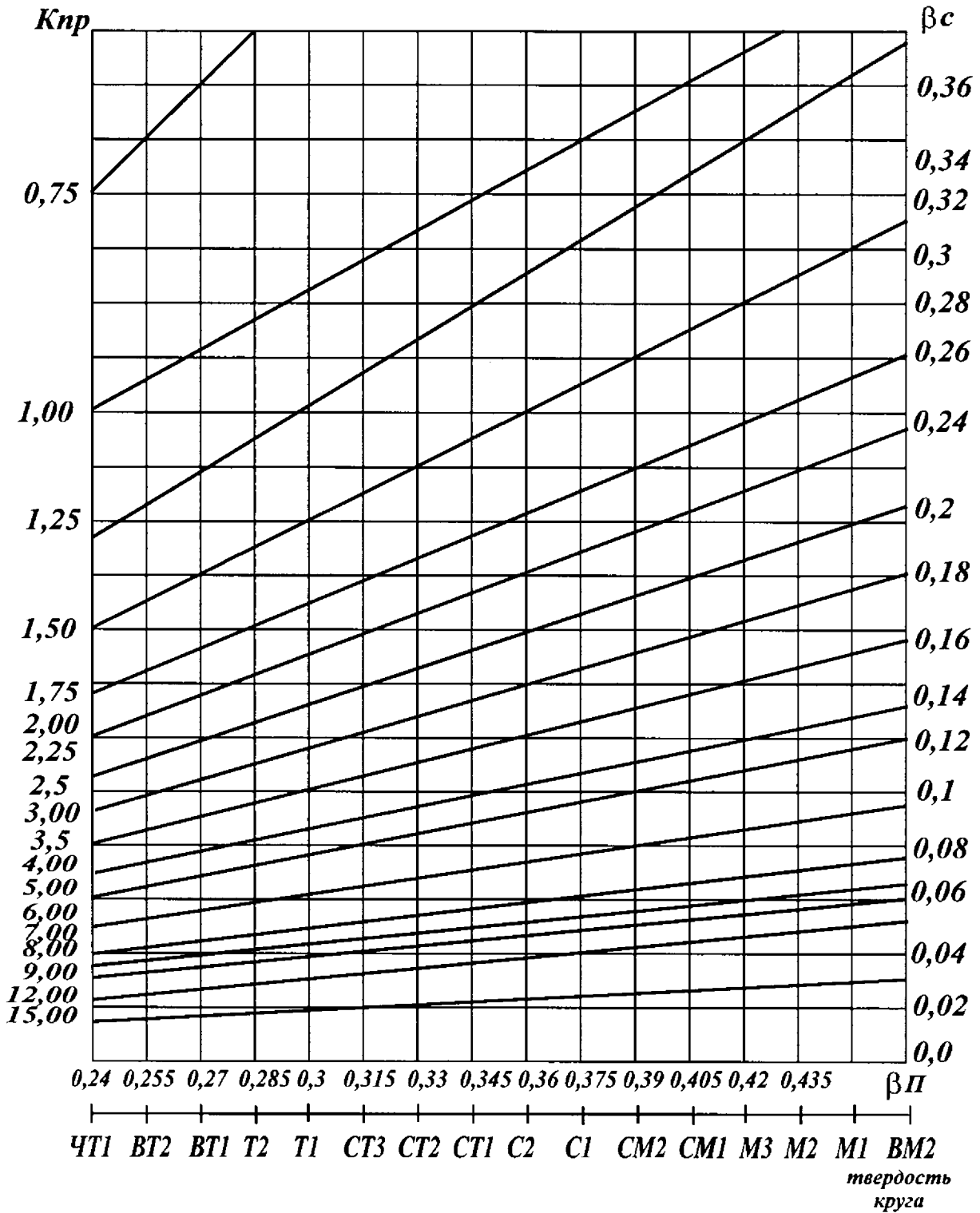


Рис. 5.44. Номограмма для определения коэффициента $K_{пр}$

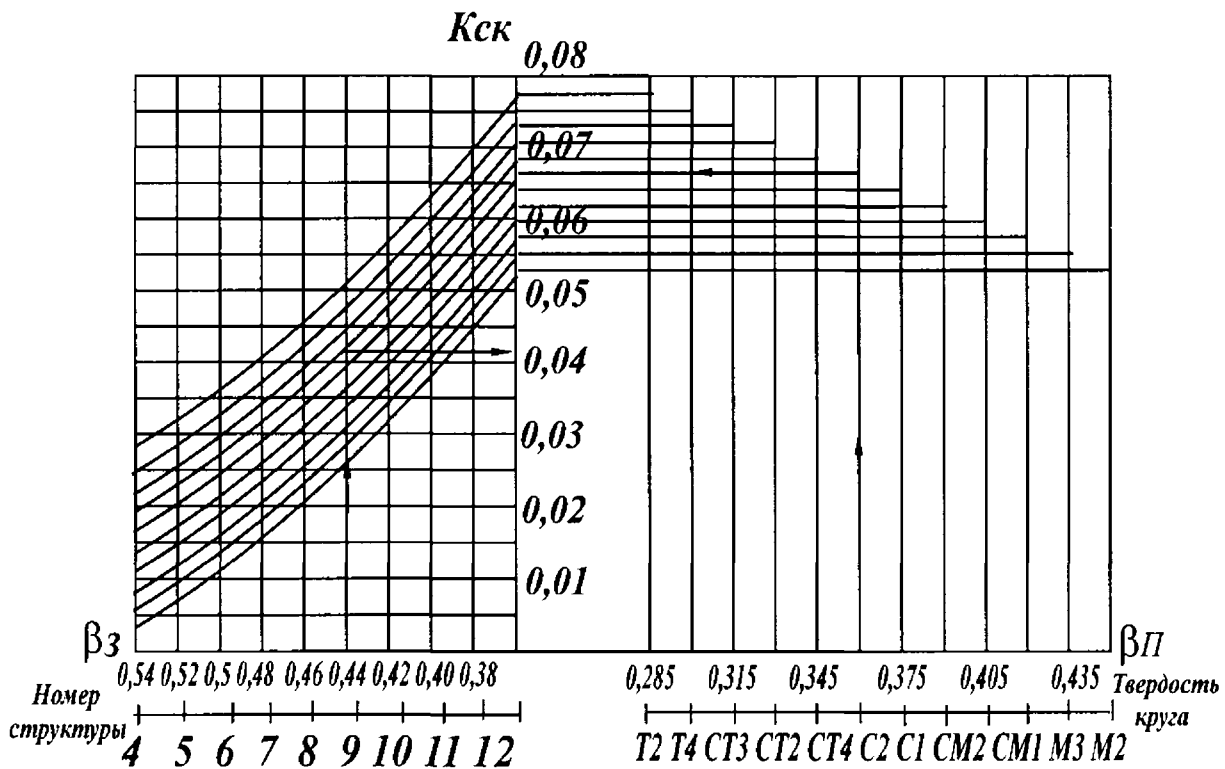


Рис. 5.45. Номограмма для определения коэффициента $K_{ск}$

С учетом формулы (5.30) выражение для N_0 при плоском шлифовании периферией круга примет вид [77]

$$N_0 = \frac{\sqrt{D_{кр} t}}{K_{\delta} d (d/t)^n} = \frac{\sqrt{D_{кр} t^{n+0,5}}}{K_{\delta} d^{n+1}}. \quad (5.32)$$

Толщина слоя, снимаемого одним обобщенным резцом t_i при шлифовании кругом на керамической связке, определяется из выражения

$$t_i = \frac{V_k \cdot V_d}{(V_k + V_d)} \cdot \sqrt{\frac{t}{D_k}} \cdot l_{\phi} = \frac{V_k \cdot V_d \cdot K_{\delta} \cdot d (d/t)^{3/2}}{(V_k + V_d)} \cdot \sqrt{\frac{t}{D_k}},$$

где V_k и V_d – скорости круга и детали.

С учетом твердости обрабатываемого материала при повышенных температурах и с учетом износа шлифовальных кругов Свирцевым В.И. [78] предложена формула для расчета составляющей силы резания F_z

$$F_z = \frac{\left(0,185 \cdot u \cdot \frac{K_B}{K_\delta} \cdot d^{-(0,5+n)} \cdot \psi\right)^{\frac{1}{1+p}} \cdot S \cdot V_D^{\frac{2+p}{2}} \cdot t^{\frac{4+p}{4(1+p)}} V_K^{-1} (t+u)^{\frac{n+0,5}{1+p}}}{\left(2 \sqrt{\frac{a}{\pi}} \cdot \frac{1}{\lambda} \cdot \frac{1}{\sqrt[4]{D_\Phi}}\right)^{1+p}}, \quad (5.33)$$

где u – коэффициент, зависящий от марки обрабатываемого материала [79].

Например, СтШХ15 – $u = 4 \cdot 10^{10}$; Ст Х18Н9Т – $u = 29,9 \cdot 10^{10}$; ВТ6 – $u = 87,48 \cdot 10^{10}$; Ст 3 – $u = 4,33 \cdot 10^{10}$.

p – параметр, зависящий от марки обрабатываемого материала. Например, СтШХ15 – $p = 1,06$; СтХ18Н9Т – $p = 0,71$; ВТ6 – $p = 0,91$; Ст3 – $p = 0,46$ [79].

Выражение (5.33) позволяет выделить для анализа ряд отдельных комплексов, оказывающих раздельное влияние на силу F_z . Например, комплекс, характеризующий влияние геометрических характеристик инструмента на силу резания F_z , имеет вид:

$$F_z = f \left[\frac{\left[\frac{K_B}{K_\delta} d^{-(0,5+n)} \cdot \psi(\xi, \eta, \gamma) \right]^{\frac{1}{1+p}}}{\left(\sqrt[4]{\frac{1}{D_K}} \right)^{\frac{p}{1+p}}} \right]. \quad (5.34)$$

В этом комплексе показатель степени $\frac{1}{1+p}$ при K_B , K_δ , d и $\psi(\xi, \eta, \gamma)$ определяются степенью снижения модифицированной твердости обрабатываемого материала. С увеличением диаметра шлифовального круга увеличивается площадь контакта, возрастает число режущих зерен и, как следствие, увеличивается сила F_z . Увеличение коэффициента вершины зерен K_B вызывает рост силы F_z , а увеличение параметра, характеризующего объемное строение абразивного круга K_δ , – уменьшение. В выражении (5.34) тангенциальная

сила резания F_z зависит от переднего угла γ и угла трения скольжения η . Причем данные параметры проявляются через функцию $\psi(\xi, \eta, \gamma)$. С возрастанием этой функции увеличивается сила резания. Она имеет следующий вид [79]

$$\psi(\xi, \eta, \gamma) = \frac{6 \cos(\eta + \gamma) \cdot (1 + \sin \gamma)}{\cos \gamma \cdot [3 \cos(\eta + \gamma) - 2 \sin \eta]}. \quad (5.35)$$

Теплофизические характеристики материала детали в выражении (5.33) учитываются следующим комплексом

$$F_z = f \left(\frac{1}{\left(\sqrt{\frac{\alpha}{\pi}} \cdot \frac{1}{\lambda} \right)^{1+p}} \right). \quad (5.36)$$

Показатель степени $\frac{p}{1+p}$ здесь определяется степенью понижения модифицированной твердости обрабатываемого материала через параметр p . Следует обратить внимание, что с увеличением коэффициента теплопроводности λ сила резания F_z , как видно из (5.36), возрастает, а температура шлифования уменьшается.

Для оценки влияния коэффициента теплопроводности на температуру шлифования рассмотрим решение одномерного дифференциального уравнения теплопроводности [80]

$$\theta(x, \tau) = \frac{2q}{\lambda} \sqrt{\alpha\tau} \cdot \text{ierfc} \frac{x}{2\sqrt{\alpha\tau}}, \quad (5.37)$$

где q – интенсивность теплового потока $q = \frac{F_z V_{кр}}{S}$.

Из анализа выражений (5.37) и (5.36) видно, что коэффициент теплопроводности λ на температуру шлифования оказывает не однозначное влияние. С увеличением λ , как видно из уравнения (5.37), температура уменьшается. С другой стороны, с увеличением λ воз-

растает сила резания F_z , пропорционально которой увеличивается интенсивность теплового потока и, соответственно, температура. Неоднозначное влияние коэффициента теплопроводности λ на температуру шлифования связано с изменением модифицированной твердости поверхностного слоя обрабатываемого материала.

Уменьшение теплопроводности материала вызывает концентрацию тепла в поверхностном слое детали и увеличение температуры шлифования. С повышением температуры уменьшается твердость обрабатываемого материала. С уменьшением твердости материала уменьшается сила резания и интенсивность теплового потока. Следовательно, с увеличением теплопроводности λ увеличивается отвод тепла из зоны резания и, как следствие, уменьшается температура и увеличивается сила резания F_z . С увеличением отвода тепла из зоны шлифования температура шлифования уменьшается, а с увеличением силы резания F_z и, как следствие, интенсивности теплового потока температура шлифования увеличивается.

Проведенный анализ показал, что увеличение коэффициента теплопроводности и уменьшение коэффициента температуропроводности способствуют уменьшению силы резания F_z .

Из зависимости (5.33) можно выделить зависимость, устанавливающую влияние режимов шлифования на силу резания

$$F_z = f \left(S \cdot V_d^{\frac{2+p}{2(1+p)}} \cdot t^{\frac{4+p}{4(1+p)}} V_k^{-1} \right). \quad (5.38)$$

Из выражения (5.38) следует, что сила F_z возрастает пропорционально росту поперечной подачи S .

Показатель степени при скорости детали V_d зависит от степени снижения твердости материала, вызванной увеличением температуры. Для более теплостойких материалов он выше.

Показатель степени при глубине шлифования t также зависит от степени снижения твердости материала и рельефа рабочей поверхности круга.

Влияние скорости резания на силу F_z имеет более сложный характер. Показатель степени при V_k не остается постоянным, он в за-

висимости от множителя $tg(\eta + \gamma)$ может быть больше и меньше единицы.

Зависимость силы резания F_z от износа зерен шлифовального круга имеет степенной характер:

$$F_z = f \left(U^{\frac{n+0,5}{1+p}} \right). \quad (5.39)$$

Показатель степени $\frac{n+0,5}{1+p}$ всегда больше единицы ($n = 1 \div 2,5$), поэтому из выражения (5.39) следует, что с увеличением радиального износа зерен круга, сила резания F_z будет всегда возрастать.

5.12.3. Конструкторско-технологическая стабилизация динамики взаимодействия инструмента с деталью и ее влияние на параметры процесса

Возникновение автоколебаний зависит от жесткости и деформирующей способности элементов системы, прочности и пластичности обрабатываемого материала, вида обработки и режимов резания.

Физический смысл возникновения автоколебаний заключается в следующем. Любое случайное возмущение (толчок), каких в реальных условиях много, приводит к возникновению собственных затухающих колебаний технологической системы. Это приводит к изменению толщины среза, и, соответственно, к изменению составляющих силы резания.

Если изменение силы резания отстает во времени от изменения толщины среза или если с увеличением скорости резания происходит уменьшение радиальной составляющей силы резания, то собственные затухающие колебания перейдут в незатухающие автоколебания.

Эти два фактора – отставание силы резания от изменения толщины среза и уменьшение силы резания от увеличения скорости резания – являются основными источниками возбуждения автоколебаний.

Кудинов В.К. [80] впервые указал, что сила резания совершает работу, идущую на возбуждение колебаний вследствие отставания ее по фазе от изменения толщины срезаемого слоя. Такого же мнения о

причинах возбуждения автоколебаний придерживаются Л.К. Кучма [81], Хон Лонг [82] и др.

Частота установившихся автоколебаний близка к собственной частоте доминирующей колебательной системы или несколько ее превышает. Для стабилизации технологических параметров необходимо знать влияние интенсивности автоколебаний на стойкость инструмента, производительность обработки и качество поверхности.

Проведенные в Пермском политехническом институте исследования [78] показали, что при амплитуде колебаний $A = 8 \div 20$ мкм стойкость инструмента имеет максимальное значение. Зависимость стойкости $T = f(A)$ от амплитуды колебаний имеет экстремальный характер.

Наличие экстремума объясняется тем, что колебания, возникающие при резании, с одной стороны, облегчают протекание пластической деформации за счет уменьшения коэффициента трения и снижения силы резания, что способствует повышению стойкости инструмента, с другой стороны циклическое нагружение инструмента, начиная с определенного предела автоколебаний, вызывает усталостное разрушение режущих элементов инструмента, что приводит к снижению его стойкости. Кроме амплитуды, на стойкость инструмента оказывает также влияние частота автоколебаний.

Для каждого конкретного режима обработки существует оптимальная (по критерию стойкости) амплитуда автоколебаний и соответствующая ей частота колебаний.

Например, амплитудам колебаний $A_{\text{опт}} = 30 \div 150$ мкм соответствует зона низких частот порядка $f = 20 \div 150$ Гц. Колебания такой интенсивности облегчают процесс пластической деформации, не вызывая при этом снижения стойкости.

Вторая зона колебаний с частотами $f = 150 \div 1000$ Гц (иногда до 3000 Гц) охватывает область автоколебаний. В этой зоне оптимальными являются автоколебания с амплитудами $A_{\text{опт}} = 8 \div 20$ мкм. Поддержание амплитуды колебаний на этом уровне значительно повышает стойкость инструмента и качество обработанной поверхности.

Третья зона включает в себя ультразвуковые вынужденные колебания, которые вводятся в зону обработки с частотами $f = 15 \div 35$ кГц.

Здесь оптимальными являются колебания с амплитудами $A_{\text{опт}} = 1 \div 5$ мкм. Такие колебания улучшают обрабатываемость. Для определения оптимальных параметров технологической системы в условиях изменяющихся условий взаимодействия инструмента с обрабатываемой деталью необходимо знать амплитуду и частоту колебаний инструмента относительно обрабатываемой детали. В первом приближении отыскание оптимальных амплитудно-частотных диапазонов с переносом в дальнейшем на реальный процесс шлифования может быть выполнено при резании металла единичным абразивным зерном.

Резание абразивным зерном, в отличие от лезвийной обработки, осуществляется в неблагоприятных условиях. Абразивные зерна имеют отрицательный передний угол и неправильную геометрическую форму, повышенную шероховатость, которая затрудняет сход стружки и оказывает влияние на характер и расположение зон деформаций. Известно [75], что в зависимости от отношения a_z / r , может быть три вида взаимодействия абразивного зерна с обрабатываемым материалом: трение скольжения, пластическое деформирование, микрорезание. За период прохождения зерна над зоной контакта, передний угол и толщина среза не остаются постоянными, следовательно, также изменяется отношение a_z / r . В пределах одного следа абразивного зерна могут быть все три вида взаимодействия. Шлифованная поверхность представляет собой совокупность продольных рисок, являющихся результатом пластической деформации и микрорезания от режущих кромок зерен (рис. 5.46).

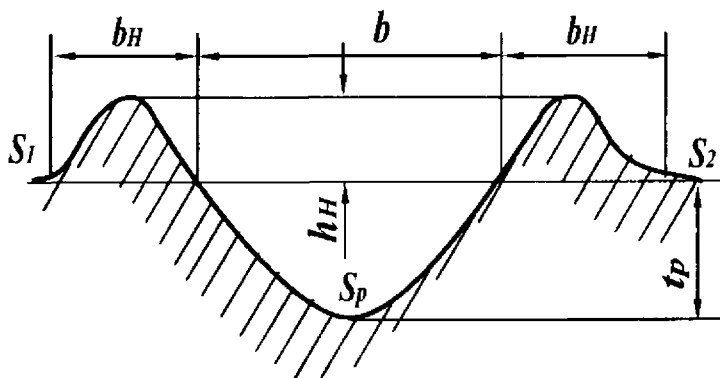


Рис. 5.46. Поперечный профиль шлифовальной риски с наплывами

По боковым сторонам риска (5.46) образуются наплывы металла с рваными краями. При микрорезании закаленной стали они меньше, чем при шлифовании незакаленной стали. Например, при микрорезании стали X18H9T коэффициент выдавливания

$$\varepsilon_n = (S_1 + S_2) / S_p = 0,45,$$

а для стали 45 $\varepsilon_n = 0,23$. Следовательно, с увеличением пластичности материала, коэффициент выдавливания ε_n увеличивается. Абразивные зерна в этом случае не срезают металл, а выдавливают его в разные стороны. Это является одной из причин, приводящих к увеличению тангенциальной составляющей силы резания и повышению неровностей шлифованной поверхности. С увеличением глубины микрорезания (начиная с $8 \div 10$ мкм), коэффициент выдавливания уменьшается, процесс микрорезания становится более эффективным.

В Пермском политехническом университете [78] для исследования оптимальных амплитудно-частотных диапазонов была создана специальная аппаратура для измерения сил резания и температуры при микрорезании.

Эффективность процесса микрорезания оценивалась по следующим функциональным зависимостям:

$$\frac{h_n}{t_p} = \varphi(t, A, f); \quad \frac{\theta}{t_p} = \varphi(t, A, f); \quad \frac{S_1 + S_2}{S_p} = \varphi(t, A, f);$$

$$\frac{F_z}{F_y} = \varphi(t, A, f); \quad \frac{F_z}{S_p} = \varphi(t, A, f).$$

Критериями оптимальности являлись минимальные значения характеристик $\frac{h_n}{t_p}$; $\frac{S_1 + S_2}{S_p}$; $\frac{F_z}{S_p}$; $\frac{\theta}{t_p}$ и максимум значения $\frac{F_z}{F_y}$.

Результаты исследований позволили установить амплитудно-частотный диапазон, в котором процесс стружкообразования наиболее эффективен [78]. Оптимальные диапазоны частот $160 \div 200$ Гц и амплитуд – $30-50$ мкм. Численные значения коэффициента режущей способности алмазного зерна P_z / P_y близки к значениям, полученным при шлифовании прерывистыми кругами [60]. Оптимальное значение амплитудно-частотного диапазона ($160 \div 200$ Гц) подтверждается минимальным значением условного напряжения микрорезания (рис. 5.47).

Динамические процессы оказывают непосредственное влияние на производительность шлифования и формирования качества поверхностного слоя обрабатываемых деталей. В связи с этим управление амплитудно-частотным диапазоном взаимодействия инструмента

с деталью является одним из путей повышения эффективности процессов шлифования.

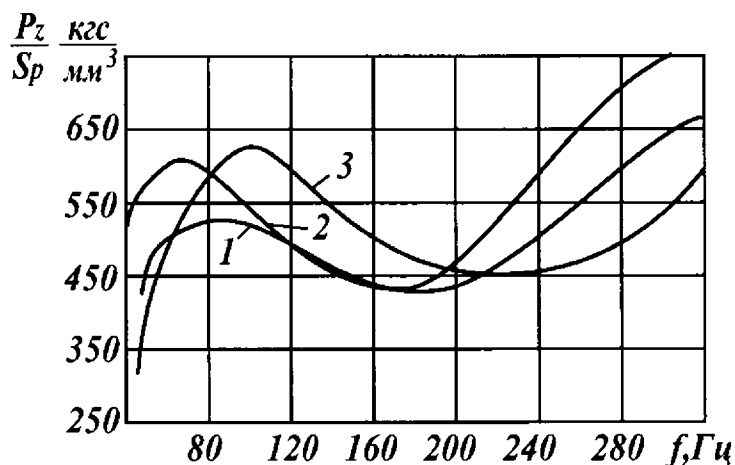


Рис. 5.47. Зависимость условного напряжения микрорезания от частоты колебаний:

1. $t = 0,01$ мм, $A = 0,002$ мм;
2. $t = 0,01$ мм, $A = 0,03$ мм;
3. $t = 0,02$ мм, $A = 0,06$ мм

Колебания при шлифовании – это сложный процесс, имеющий разнообразные источники их возбуждения. В колебательном процессе участвуют собственные, вынужденные и автоколебания. При определенных условиях вынужденные колебания могут синхронизировать автоколебания, вызванные процессом резания. Амплитудно-частотные диапазоны вибраций определяются условиями

шлифования и динамическими свойствами упругой системы станка. При этом следует различать энергетическую эффективность процесса шлифования, определяемую согласованием частот вынужденных колебаний с частотами собственных колебаний упругой системы станка.

Для возбуждения колебаний желательно использовать в качестве источника вибраций сам процесс шлифования.

Возбуждение вибраций принудительным способом связано с определенными затратами, включающими изготовление специальных устройств и применение сложной дорогостоящей аппаратуры – генераторов и усилителей.

Наиболее доступным и более дешевым способом возбуждения колебаний является применение кругов с прерывистой рабочей поверхностью. Способ прерывистого способа позволяет с позиции энергетической эффективности осуществлять управление динамикой процесса и оптимизировать амплитудно-частотные характеристики. За счет прерывания процесса резания можно обеспечить безрезонансную и устойчивую работу упругой системы и получение требуемых показателей качества поверхностного слоя.

5.12.4. Способы формирования регулярного макрорельефа на рабочей поверхности шлифовального круга

Существующая технология изготовления прерывистых кругов закономерно обратила внимание исследователей на правку.

Действительно, правка круга является неотъемлемой частью процесса шлифования и, поскольку производить ее периодически все равно необходимо, то является весьма заманчивым и перспективным разработка способов, позволяющих формировать прерывистый рельеф на поверхности круга в процессе правки.

В работе [83] предложено устройство для формирования регулярного рельефа на круге за счет вынужденных механических колебаний (рис. 5.48). Кулачок, который является шаблоном требуемой поверхности круга, устанавливается на шпиндель станка. Правящий инструмент, жестко связанный с толкателем кулачкового механизма, снабжен механизмом для регулировки глубины правки.

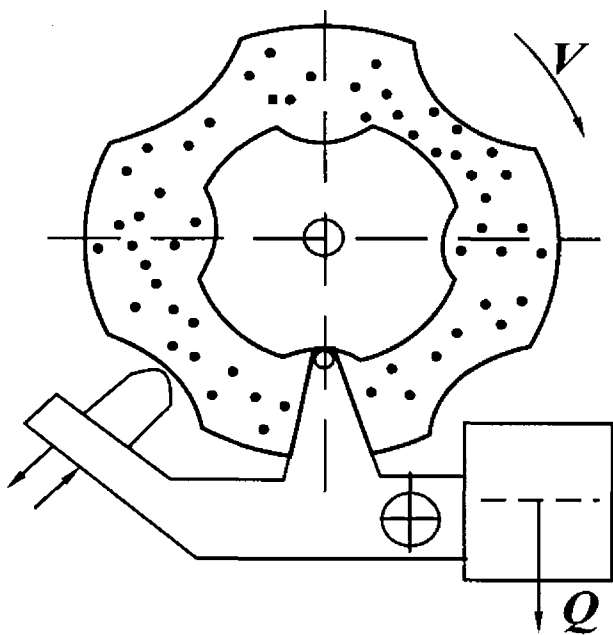


Рис. 5.48. Схема формирования регулярного рельефа на круге за счет вынужденных механических колебаний

Параметр t_0 связан с глубиной правки, устанавливаемой по лимбу станка. На рабочей поверхности круга прорезается канавка с мгновенной глубиной резания

$$t_2 = R_{кр} - S(\tau). \quad (5.40)$$

Исследования П.Н. Стефанкова показали, что при профилировании круга на рабочей скорости возникают большие динамические нагрузки и происходит интенсивный износ кулачков.

Регулярный прерывистый рельеф на поверхности круга можно наносить при правке за счет возбуждения автоколебаний правящего инструмента. Для возбуждения автоколебаний правящий инструмент – алмаз – должен иметь площадку при вершине (рис. 5.49). Режущая кромка правящего инструмента устанавливается со смещением от центра круга на расстояние a , а от периферии круга на расстояние t_0 .

Тангенциальная составляющая силы правки $F_{пр}$ определяется по формуле [78]

$$F_{пр} = K' \cdot [t_1(d - \Delta) + t_2\Delta], \quad (5.41)$$

где d —ширина режущей части алмазного наконечника (рис. 5.49); Δ —подача инструмента на оборот круга; K' —коэффициент пропорциональности, зависящий от условий правки; t_1 —глубина резания по обработанной поверхности круга $t_1 = S(\tau) - S(\tau - \tau_0)$; $\tau_0 = 1/\nu$ — период вращения круга; ν —частота вращения круга, Гц.

Функция $S(\tau)$ характеризует мгновенное положение вершины инструмента относительно центра детали

$$S(\tau) = \sqrt{(R - t_0)^2 - [a + x(\tau)]^2}, \quad (5.42)$$

где $x(\tau)$ —упругие смещения вершины инструмента вдоль оси x относительно начального положения.

Уравнение колебаний инструмента в направлении оси x имеет вид

$$m\ddot{x} + \eta\dot{x} + Kx = \xi f[x(\tau)], \quad (5.43)$$

где m — приведенная масса инструмента; η —коэффициент затухания; K — жесткость инструмента в направлении оси x .

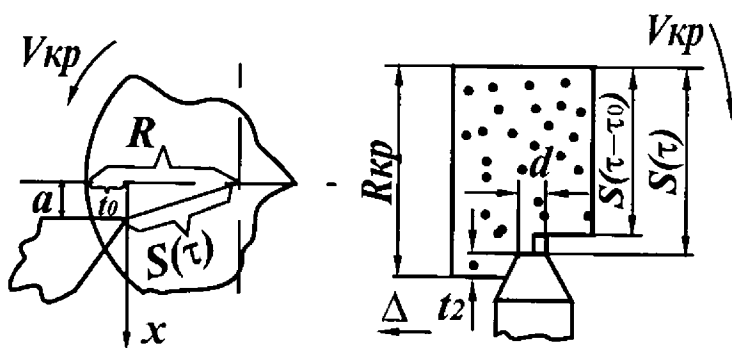


Рис. 5.49. Расчетная схема

Уравнение (5.43) относится к классу нелинейных уравнений с малым параметром $\xi \ll 1$.

Применяя метод малого параметра в работах [84,85] из решения уравнения (5.43) получено выражение для амплитуды автоколебаний

$$A^2 = \frac{8r^2}{3} \left[1 + \frac{\eta\omega_0}{\xi K'(d - \Delta) \sin(\omega - \tau_0)} \right], \quad (5.44)$$

где ω – частота автоколебаний, равная $(\omega_0 + \delta)$; δ – поправка на частоту собственных колебаний инструмента; $\omega_0 = \sqrt{K/m}$;

$$r = \sqrt{(R_{кр} - t_0)^2 + a^2}.$$

Поправка на частоту автоколебаний определяется из выражения

$$\delta = \eta \cdot \frac{(d - \Delta) \cdot \cos(\omega_0 \tau_0) - d}{2(d - \Delta) \cdot \sin(\omega_0 \tau_0) \cdot m}.$$

В работе [78] доказано, что при правке круга возбудить автоколебания инструмента можно только на частотах, не кратных частоте вращения круга. Кроме того, каждый последующий единичный выступ на круге должен быть смещен относительно предыдущего в направлении, противоположном направлению вращения круга.

На рис.5.50 показана схема нанесения канавок переменной глубины на поверхность круга. За период одного оборота шлифовально-го круга алмаз совершает неполных три цикла колебаний.

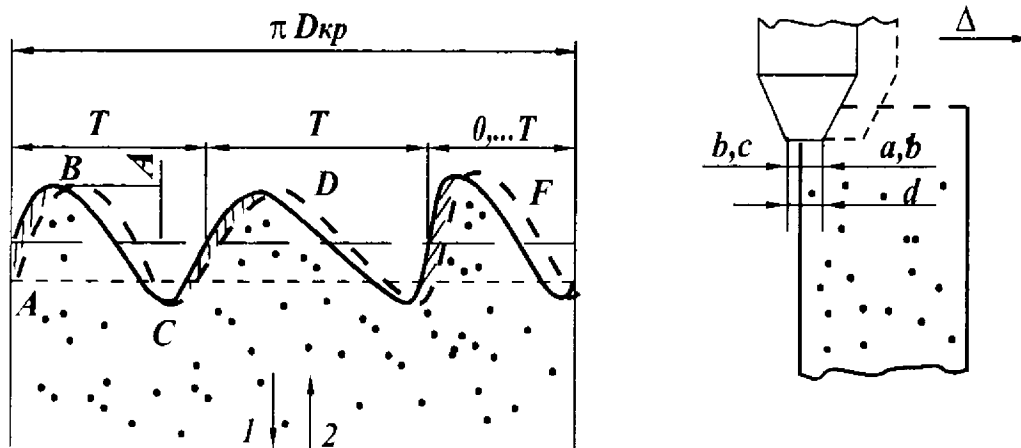


Рис. 5.50. Схема нанесения канавок на круге переменной глубины

При первом реze алмаз, врезавшись в круг на величину поперечной подачи $S_{\text{поп}} = ab$ (рис. 5.50, б) прорезает на круге канавку переменной глубины (контурная линия) (рис. 5.50, а). За второй оборот круга участок алмаза ab прорезает аналогичную канавку, глубина которой изменяется по тому же закону. Вторая канавка смещена относительно первой в сторону, противоположную направлению вращения круга (штриховая кривая).

Принципиально важным является то, что на втором обороте круга участок площадки алмаза bc ($bc \leq ab$) описывая ту же траекторию, что и участок ab , осуществляет срезание абразива на отрезках AB , CD , EF и т. д. (рис. 5.50, *a*). Срезаемые объемы на рисунке заштрихованы.

В результате получается следующая картина. При выходе инструмента из круга (по стрелке 1) алмаз врезается в предыдущие слои обработки, а при врезании в круг (по стрелке 2) он зависает над ними. Следовательно, при этих условиях сила резания при выходе инструмента из круга будет больше, чем при внедрении в круг.

Различие сил обеспечивает прилив энергии, необходимой для компенсации рассеивания энергии в системе.

Таким образом, на основании теоретически установленных условий возбуждения автоколебаний вскрыта причина их возникновения и поддержания автоколебаний при правке.

Для нанесения регулярного рельефа на круг с использованием автоколебаний было изготовлено приспособление (рис. 5.51) [87].

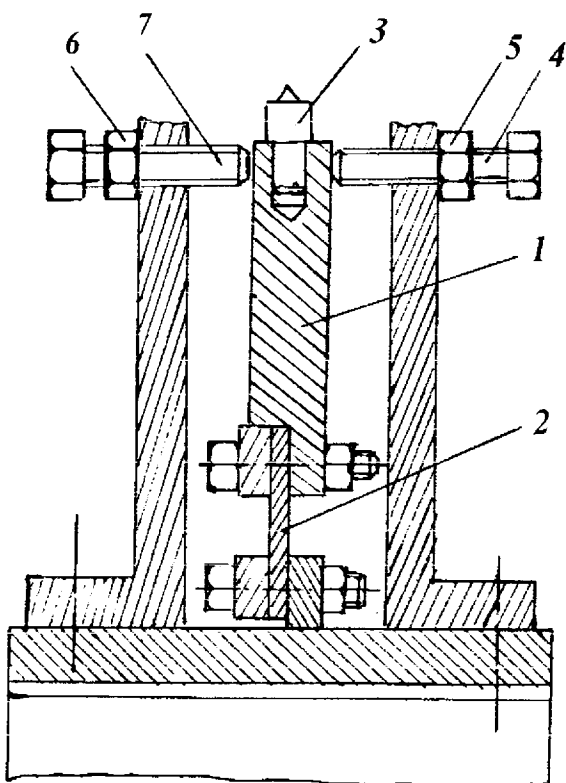


Рис. 5.51. Приспособление для нанесения регулярного рельефа на круге



Рис. 5.52. Внешний вид прерывистого круга с винтовой канавкой

Из рисунка следует, что головка с алмазом 3 за счет гибкого упругого элемента 2 может совершать изгибные колебания. С разных сторон головки установлены регулируемые упоры 4 и 7. Упоры срезают верхушки синусоиды, и колебания, трансформируясь, приближаются по виду к треугольной форме.

Настройка приспособления производится в следующей последовательности. Один из болтов (упор) подводится до касания с державкой 1 и контрится гайкой 5. Между вторым болтом (упором) 7 и державкой с помощью щупа устанавливается требуемый зазор, и в этом положении болт также контрится гайкой 6.

Приспособление устанавливается на магнитный стол станка таким образом, чтобы сила правки отрывала державку от болта 4, подведенного до касания с державкой 1.

Вершина алмаза должна быть смещена от оси круга в сторону его вращения на 0,05 – 0,06 мм. Эта рекомендация основывается на том, что, исходя из зависимости (5.44), амплитуда автоколебаний при прочих равных условиях будет тем больше, чем больше a . Это позволяет расширить технологические возможности способа. Ограничением здесь является то, что при чрезмерном увеличении a , круг может срезать основу, удерживающую алмаз в державке.

Внешний вид круга с винтовыми выступами показан на рис.5.52. Такие конструкции кругов могут применяться для шлифования цилиндрических деталей на круглошлифовальных станках. При шлифовании этими кругами не возникает параметрический резонанс, так как процесс протекает с постоянным прижимом круга к детали.

Винтовые прерывистые круги имеют более высокую производительность, работают без динамических ударов, обеспечивая более высокое качество поверхностного слоя.

5.12.5. Динамика изменения температуры при шлифовании винтовыми прерывистыми кругами

Расчетная схема для определения теплонапряженности процесса шлифования кругами с винтовыми канавками представлена на рис. 5.53.

По поверхности $X = 0$ полубесконечного пространства движется бесконечно длинный тепловой источник шириной $2h$ со скоростью V_d в направлении оси Z . Внутри этого источника перемещают-

ся со скоростью V_H микроисточники шириной l_1 . Расстояние между микроисточниками l_2 .

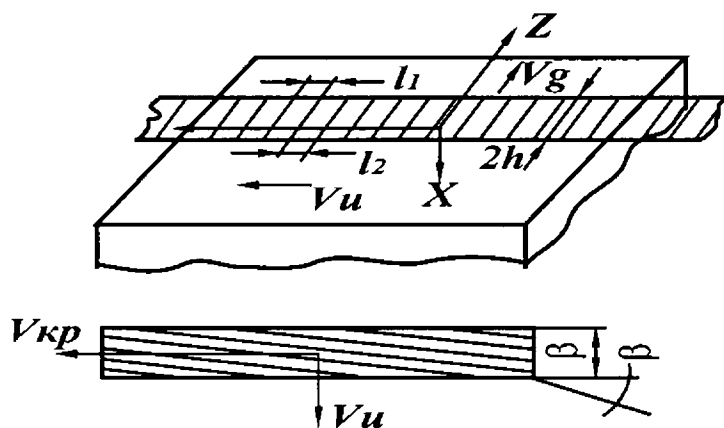


Рис. 5.53. Расчетная схема

В период разрыва процесса, т. е. за время прохождения впадины l_2 , будет происходить охлаждение поверхности на величину $\Delta\theta$. Динамику изменения температуры поверхности с учетом нагрева и охлаждения можно представить в виде следующего выражения

$$\theta = \theta_0 - \Delta\theta_1, \quad (5.45)$$

где θ_0 – возрастание температуры за период прохождения режущего выступа [78]

$$\theta_0 = \frac{2q_0\sqrt{az}}{\lambda\sqrt{\pi V_d}}, \quad (5.46)$$

где z – координата макроисточника, равная $V_d\tau$; q_0 – плотность теплового потока при шлифовании кругом со сплошной рабочей поверхностью, Вт/м²; a – коэффициент температуропроводности, м²/с; λ – коэффициент теплопроводности, Дж/(м²·с·град); V_d – скорость перемещения зоны контакта в направлении продольной подачи стола в направлении оси, м/с; $\Delta\theta_1$ – степень понижения температуры от стока тепла за счет прерывания процесса резания

$$\Delta\theta = \frac{2(q_0 - \psi \cdot q_0) \cdot \sqrt{a}}{\lambda \cdot \sqrt{\pi V_H}} \cdot f(y'), \quad (5.47)$$

где ψ – коэффициент, учитывающий характер изменения интенсивности теплового потока q_0 .

В зависимости от конструкции прерывистого круга параметр ψ может изменяться от 1 до 0.

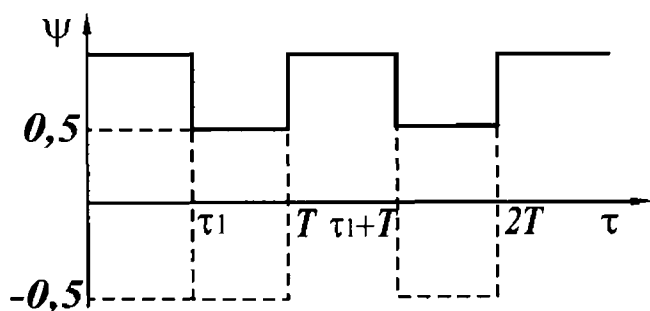


Рис. 5.54. Функция изменения плотности теплового потока во времени

Если за период разрыва процесса резания из зоны контакта будет отводиться тепло за счет охлаждающих средств, то параметр ψ может иметь отрицательное значение (рис. 5.54).

Функция $f(y')$ в выражении (5.47) учитывает многократность действия микро-

источников на фиксированную точку детали. Она может быть представлена в виде [86]

$$f(y') = \sum_{i=0}^{n-1} \left(\sqrt{y' - i\Delta} - \sqrt{y' - i\Delta - l_2} \right), \quad (5.48)$$

где $\Delta = l_1 + l_2$; y' – координата микроисточника (расстояние, которое пройдет микроисточник к фиксированной точке за время $\tau = z/V_d$), $y' = (V_n/V_d) \cdot z$; z – путь, пройденный микроисточником за время τ ; $V_n = V_{кр} \operatorname{tg} \beta$; β – угол наклона винтовых канавок (рис. 5.53)

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{(l_1 + l_2) \cdot m}{\pi \cdot D_{кр}},$$

где m – число заходов винтовых канавок; $D_{кр}$ – диаметр круга; n – количество микроисточников, прошедших через фиксированную точку детали за время τ

$$n = E \left\{ \frac{V_n z}{V_d \Delta} \right\},$$

где E – целая часть.

Температура шлифования достигает своего максимального значения на задней кромке теплового источника, т. е. при $z = 2h$.

Выражение (5.48) примет вид

$$f(y') = \sum_{i=0}^{n-1} \left(\sqrt{\frac{2h}{V_d} V_n - i\Delta} - \sqrt{\frac{2h}{V_d} V_n - i\Delta - l_2} \right). \quad (5.49)$$

Принимая максимальное количество микроисточников, прошедших над фиксированной точкой в области задней кромки теплового источника

$$N = E \frac{V_{\text{и}} 2h}{V_{\text{д}} \Delta}, \quad (5.50)$$

получим функцию

$$f(y') = \sum_{i=0}^{N-1} \left(\sqrt{(N-i)\Delta} - \sqrt{\Delta(N-i) - \frac{l_2}{\Delta}} \right). \quad (5.51)$$

Выражение (5.51) можно представить в виде

$$f(y') = \sqrt{N\Delta} f_N \left(\frac{l_2}{\Delta} \right). \quad (5.52)$$

Приравнявая выражения (5.51) и (5.58), получим

$$f_N \left(\frac{l_2}{\Delta} \right) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{i=0}^{N-1} \left(\sqrt{N-i} - \sqrt{N-i - \frac{l_2}{\Delta}} \right). \quad (5.53)$$

С учетом выражения (5.53) величину снижения температуры за счет микропрерывания процесса резания можно найти из выражения

$$\Delta\theta_1 = \frac{2(q_0 - \psi q_0) \sqrt{2ha}}{\lambda \sqrt{\pi V_{\text{д}}}} f_N \left(\frac{l_2}{\Delta} \right). \quad (5.54)$$

Температура шлифования на задней кромке теплового источника определяется по формуле

$$\begin{aligned} \theta_{\text{max}} = \theta_{0\text{max}} - \Delta\theta_1 &= \frac{2q_0 \sqrt{2ha}}{\lambda \sqrt{\pi V_{\text{д}}}} - \frac{2(q_0 - \psi q_0) \sqrt{2ha}}{\lambda \sqrt{\pi V_{\text{д}}}} \cdot f_N \cdot \frac{l_2}{\Delta} = \\ &= \frac{2q_0 \sqrt{2ha}}{\lambda \sqrt{\pi V_{\text{д}}}} \left[1 - (1 - \psi) \cdot f_N \cdot \left(\frac{l_2}{l_2 + l_1} \right) \right]. \end{aligned} \quad (5.55)$$

Выражение (5.55) можно представить в виде

$$\theta_{\max} = \frac{2q_0 \sqrt{2ha}}{\lambda \sqrt{\pi V_d}} \cdot K, \quad (5.56)$$

где K – коэффициент, учитывающий динамику снижения температуры, с учетом наличия на рабочей поверхности круга винтовых канавок

$$K = 1 - (1 - \psi) \cdot f_N \cdot \left(\frac{l_2}{l_1 + l_2} \right). \quad (5.57)$$

Для оценки влияния степени снижения температуры $\Delta\theta$ произведен расчет параметра K .

Исходные данные для расчета: $t = 0,05$ мм; $D_{\text{кр}} = 200$ мм; $l_1 = 2,5$ мм; $l_2 = 2,5$ мм; $V_{\text{кр}} = 30$ м / с; $m = 4$.

$$\text{tg}\beta = \frac{(l_1 + l_2)m}{\pi D} = \frac{20}{3,14 \cdot 200} = 0,03185,$$

$$V_{\text{и}} = V_{\text{кр}} \text{tg}\beta = 30 \cdot 0,03185 = 0,9554 \text{ м / с.}$$

В табл. 5.11 представлены расчетные данные параметра K для различных значений скоростей детали V_d и коэффициента ψ .

Т а б л и ц а 5.11

$V_d, \text{м/мин}$	N	$f\left(\frac{l_2}{\Delta}\right)$	K			
			$\psi = -0,5$	$\psi = 0$	$\psi = 0,5$	$\psi = 1$
6	6	0,400	0,400	0,600	0,800	1,0
8	4	0,378	0,433	0,622	0,811	1,0
10	3	0,382	0,457	0,638	0,819	1,0

Из данных, приведенных в таблице, следует, что наиболее существенное влияние на температуру шлифования оказывает не число макроисточников N , а параметр ψ .

При $\psi = 1$ степень понижения температуры равна нулю. Этот вариант обработки соответствует сплошному шлифованию.

При $\psi = 0,5$ температура в зоне контакта снижается на 19 – 20%. Это условие соответствует процессу шлифования композиционным кругом, т. е. кругом, промежутки между режущими канавками которого заполнены, например, графитовыми вставками.

При $\psi = 0$ температура шлифования по сравнению со сплошным кругом снижается на 30 – 40%. Это условие соответствует процессу шлифования с прорезанными на периферии круга наклонными пазами.

Г Л А В А 6

ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА ИЗДЕЛИЯ

6.1. КАЧЕСТВО ПРОДУКЦИИ

Качество продукции – совокупность свойств, обуславливающих пригодность продукции удовлетворять определенным требованиям в соответствии с ее назначением (ГОСТ 15467 – 79).

В условиях рыночной экономики качество продукции охватывает не только потребительские и технологические свойства, но и конструкторско-художественные особенности, надежность, требуемый уровень стандартизации и унификации деталей и узлов.

Качество машин характеризуется рядом показателей, которые можно разделить на следующие три группы.

1. Технический уровень, определяющий степень совершенства машины: мощность, КПД, производительность, экономичность и др.

2. Производственно-технологические показатели (или показатели технологической конструкции), характеризующие эффективность конструктивных решений с точки зрения обеспечения оптимальных затрат труда и средств на изготовление изделия, его эксплуатацию, техническое обслуживание и ремонт.

3. Эксплуатационные показатели:

а) надежность изделия;

б) эргономическая характеристика или степень учета комплекса гигиенических, физиологических и других потребностей человека в системе человек – машина – среда.

в) эстетическая оценка, т. е. совершенство художественной композиции, внешнее оформление изделия и др.

Уровень качества – характеристика относительная, основанная на сравнении показателей качества данного изделия с базовыми показателями.

К высшей категории качества относится продукция, которая по технико-экономическим показателям находится на уровне мировых достижений. Такая продукция характеризуется стабильностью показателей качества, строгим соблюдением технологической дисциплины и высоким уровнем культуры производства.

К первой категории качества относится продукция, отвечающая ее нормативно-техническим документам и имеющая зарегистрированное решение государственной аттестационной комиссии.

6.2. РАБОТОСПОСОБНОСТЬ И НАДЕЖНОСТЬ МАШИН

Надежность – свойство изделия сохранять значения установленных параметров функционирования в определенных условиях, соответствующих заданным режимам и условиям использования, технического обслуживания, хранения и транспортировки.

Надежность – комплексное свойство, которое в зависимости от назначения изделия и условий его эксплуатации включает безотказность, долговечность, ремонтпригодность и сохраняемость этих свойств. Основное понятие, используемое в теории надежности, – понятие отказа.

Отказ – это событие, связанное с нарушением работоспособности изделия, наступающее либо внезапно, либо постепенно.

Работоспособное состояние – это такое состояние объекта, при котором он способен выполнять заданные функции, сохраняя значение заданных параметров в пределах, установленных нормативно-технической документацией.

Надежность изделий, которые могут находиться в двух возможных состояниях – работоспособном и неработоспособном, оценивается вероятностью безотказной работы $P(t)$

$$P(t) = 1 - F(t) = \exp\left(-\int_0^{\infty} \lambda(t) dt\right), \quad (6.1)$$

где $F(t)$ функция распределения времени работы объекта до отказа; $\lambda(t)$ – интенсивность отказов.

Аналитическая интенсивность отказов определяется по формуле

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{p(t)},$$

где $f(t) = F'(t)$ – плотность распределения времени безотказной работы.

Уровень надежности и необходимость его повышения должна решаться в первую очередь с экономических позиций.

Для достижения требуемого качества изделий затраты могут быть столь высоки, что эффект от повышения надежности объекта их не возместит, и суммарный эффект от проведенных мероприятий будет отрицательным.

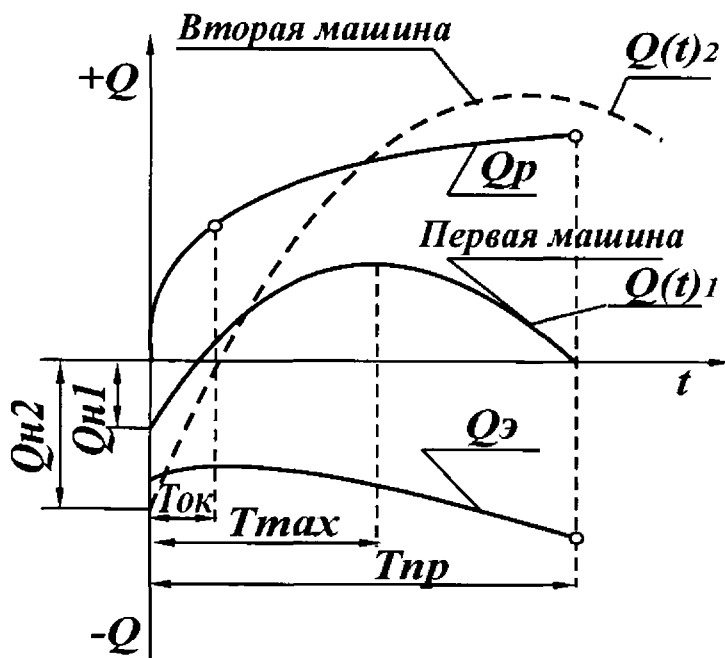


Рис. 6.1. Зависимость суммарной эффективности $Q(t)$ от времени эксплуатации машин с учетом прибыли Q_p и затрат на изготовление Q_n и эксплуатацию $Q_э$

дет отрицательным.

Наука и практика подсказывают широкий диапазон разнообразных возможных вариантов по повышению качественных характеристик машины на период ее изготовления. Например, применение более качественных материалов, повышение точности деталей, тщательный контроль качества их поверхностного слоя и т. д.

Однако при сравнении различных вариантов достижения требуемого уровня надежности, следует исходить из условий получения

наибольшего суммарного экономического эффекта с учетом затрат на изготовление новой машины Q_n , включающие затраты на проектирование, изготовление, испытание, отладку, транспортировку к месту работы и другие затраты, а также затраты на эксплуатацию $Q_э$, включая техническое обслуживание, ремонт, профилактические мероприятия, т. е. все то, что связано с поддержанием и восстановле-

нием работоспособности машины. Эти затраты являются отрицательными (рис.6.1).

С другой стороны, работа машины дает положительный экономический эффект Q_p (прибыль) в зависимости от целевого назначения. Например, для технологического оборудования – изготовление новой продукции, для транспортных машин – перевозка грузов, для двигателей – преобразование энергии и т. д.

Затраты на эксплуатацию Q_3 с течением времени возрастают, так как износ и старение отдельных элементов машины приводят к необходимости вкладывать все большие средства для восстановления утраченных свойств. Изменение прибыли Q_p во времени, наоборот, имеет тенденцию к уменьшению интенсивности роста, поскольку более частые простои машин в ремонте снижают ее производительность. Поэтому зависимость суммарной эффективности будет иметь вид

$$Q(t) = Q_n + Q_3(t) + Q_p(t). \quad (6.2)$$

В период времени $t = T_{ок}$ машина за счет прибыли при ее эксплуатации компенсирует затраты на ее изготовление. Этот период называется сроком окупаемости. Начиная с этого момента, $t = T_{ок}$ машина начинает приносить реальную прибыль.

Однако интенсивность прироста прибыли с течением времени работы машины постепенно будет уменьшаться из-за возрастания эксплуатационных затрат, и при $t = T_{пр}$ экономическая эффективность будет равна нулю. При $t > T_{пр}$ затраты на эксплуатацию будут превышать экономический эффект, который может обеспечить машина (рис.6.1). Длительность экономически целесообразной эксплуатации машины T_3 находится в диапазоне между T_{max} и предельным сроком службы машины $T_{пр}$

$$T_{max} < T_3 < T_{пр}.$$

Выбор варианта конструкции машины с позиции надежности должен исходить из сопоставления затрат на изготовление и эксплуатацию машины с тем экономическим эффектом, который она может обеспечить.

Например, как видно из рис.6.1, начальные затраты $Q_{н2}$ на изготовление машины №2 значительно превышают затраты $Q_{н1}$ на изготовление машины №1, но за счет более высоких эксплуатационных показателей (по производительности, качеству и надежности) машина №2 дает больший экономический эффект и ее целесообразно эксплуатировать более длительное время.

Показателем надежности, с экономической точки зрения, может служить сумма затрат, связанных с изготовлением $Q_{н}$ и эксплуатацией $Q_{э}$ машины, отнесенная к длительности ее эксплуатации $T_{э}$.

$$K_{э} = \frac{Q_{н} + Q_{э}}{T_{э}}, \quad (6.3)$$

где $K_{э}$ – экономический показатель надежности, руб/ч; $Q_{н}$ – стоимость изготовления новой машины, руб; $Q_{э}$ – суммарные затраты на эксплуатацию, ремонт и обслуживание, руб; $T_{э}$ – период эксплуатации машины, час.

Необходимо стремиться к минимальному значению этого показателя за счет рационального распределения капиталовложений между сферой производства и сферой эксплуатации. Следует заметить, что чем дешевле изделие, тем больше затрат приходится на его эксплуатацию.

На рис.6.2 приведены затраты на изготовление и эксплуатацию вагонеток ВД-4 для угольных шахт в зависимости от вероятности обеспечения грузопотока $P(t)$ [42]. При изменении требований безотказности $P(t)$ от 0,53 до 0,95 затраты $Q_{н}$ возрастают, соответственно, от 25 до 170 тыс. рублей, а эксплуатационные затраты $Q_{э}$ снижаются с 210 до 30 тыс. рублей. В результате оптимальный уровень надежности в данном случае соответствует $P(t) = 0,75$ (см. рис.6.2).

С экономических позиций следует иметь в виду, что требования безотказности связаны с затратами на изготовление и эксплуатацию изделия. При более высоких требованиях к безотказности работы изделия необходимо повышать затраты на его изготовление $Q_{н}$, уменьшая при этом затраты на эксплуатацию $Q_{э}$.

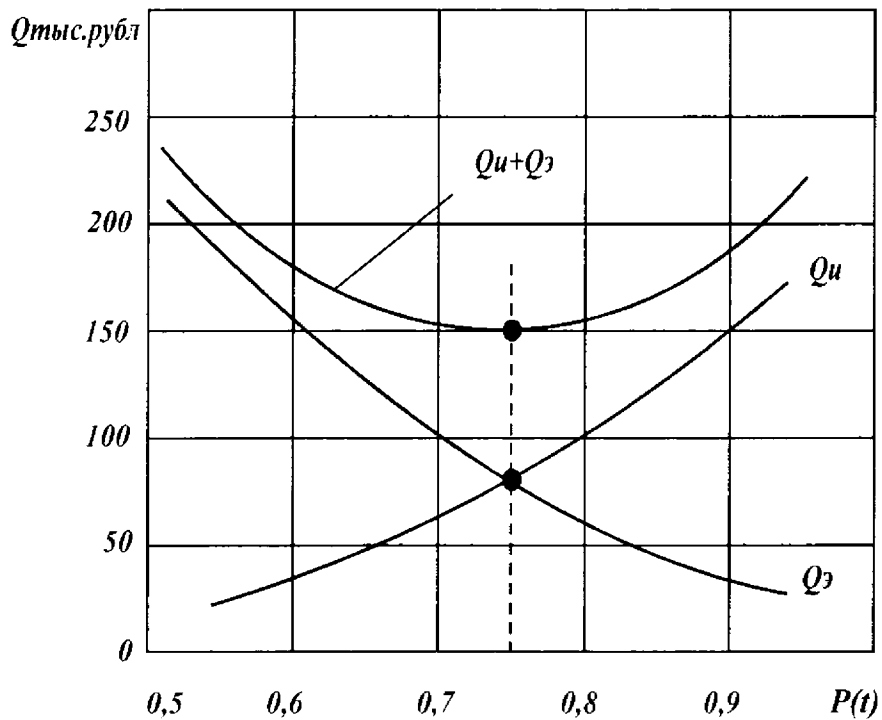


Рис. 6.2. Зависимость затрат на изготовление $Q_{и}$ и эксплуатацию $Q_{э}$ вагонеток $BD-4$ для угольных шахт от вероятности обеспечения грузопотока

В процессе эксплуатации машины действуют различные виды энергии, которые вызывают в ее узлах и деталях процессы, снижающие начальные параметры изделия. Эти процессы связаны, как правило, со сложными физико-химическими явлениями, вызывающими износ, коррозию, деформацию и другие виды повреждений. Накопление повреждений с течением времени может привести к отказу работы машины.

6.3. ПРИЧИНЫ, ВЫЗЫВАЮЩИЕ ПРЕЖДЕВРЕМЕННЫЙ ВЫХОД ИЗ СТРОЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

Надежность машины отражает свойство сохранять требуемые качественные показатели в течение всего периода ее эксплуатации. Она зависит от конструкции машины, применяемых материалов, качества изготовления деталей и сборки узлов, способа контроля и испытания, а также от условий и режимов работы, методов технического обслуживания и принятой системы ремонта.

Проблема увеличения надежности машин связана со сферами проектирования, производства и эксплуатации. При эксплуатации машины в структуре материала деталей происходят обратимые и необратимые процессы, которые изменяют ее эксплуатационные характеристики. К категории обратимых относятся процессы, связанные с изменением температуры самой машины и окружающей среды, а также с изменением влажности. К необратимым процессам относят изнашивание деталей, коррозию, усталость, перераспределение внутренних напряжений и коробление деталей с течением времени.

Поэтому для сохранения эксплуатационных характеристик деталей машин необходимо иметь четкое представление об источниках и причинах их снижения; знать реакцию деталей машин на различные воздействия и на основании этой информации создавать новые системы и технологические процессы, которые обеспечивают в течение необходимого периода требуемые эксплуатационные характеристики деталей.

Причинами, вызывающими появление внезапных отказов работы отдельных деталей машин, являются: наличие на рабочих поверхностях деталей шлифовочных трещин и прижогов, заклинивание передачи в результате недостаточной маслостойкости стыка трущихся поверхностей и т. д. Отказы также возникают в результате длительного накопления повреждений в материале деталей или в результате износа трущихся поверхностей.

Происходящие в поверхностных слоях деталей усталостные явления играют особую роль в протекании процессов старения и разрушения материала при эксплуатации. Поэтому состояние поверхностного слоя, которое формируется в основном на стадии финишных операций, определяет интенсивность износа, величину контактных деформаций, усталостные и коррозионные процессы.

Разрушение деталей в большинстве случаев начинается с поверхности и зависит от ее состояния. Влияние поверхностного слоя материала деталей на эксплуатационные характеристики связано с наличием избыточной поверхностной энергии, так как молекулы и атомы, находящиеся у поверхности, имеют свободные связи, способствующие протеканию явлений поглощения (адсорбции), сцепления (когезии), прилипания (адгезии) и других видов взаимодействия с окружающей средой.

В процессе обработки под воздействием сил резания и высоких температур в поверхностном слое возникает ряд побочных явлений,

изменяющих свойство материала. Физико-химические параметры, структура и напряженное состояние поверхностного слоя материала после обработки существенно отличаются от свойств материала глубинных слоев.

Основными параметрами, характеризующими эксплуатационные свойства деталей, являются: геометрия поверхности (включая шероховатость, волнистость и отдельные поверхностные дефекты); напряженность поверхностных слоев материала деталей, возникающая в макро- и микрообъемах; структура поверхностного слоя, сформированная в условиях пластической деформации, высоких температур, окислительных процессов и других воздействий.

Для прогнозирования физико-механических свойств поверхностных слоев материала деталей и управления ими в процессе изготовления необходимо знать функциональные связи этих параметров с эксплуатационными свойствами изделий и технологические пути управления качеством.

6.4. СВЯЗЬ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ОБРАБАТЫВАЕМОЙ ПОВЕРХНОСТИ С ЭКСПЛУАТАЦИОННЫМИ СВОЙСТВАМИ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

Эксплуатация любой машины неизбежно сопровождается трением. В результате происходит постепенное изменение размеров и шероховатости поверхности трущихся частей деталей, т. е. изнашивание рабочих участков. Это вызывает изменение характера сопряжений деталей, вредно отражающееся на их нормальной работе (увеличиваются зазоры между трущимися поверхностями, возникают вибрации, удары, ухудшаются условия смазки, уменьшается жесткость и прочность деталей, снижается точность машины). За период начального износа высота неровностей по отношению к исходной уменьшается на 50 – 70% при одновременном увеличении фактической поверхности контакта. Однако следует заметить, что в период приработки высота неровностей трущихся поверхностей в ряде случаев не уменьшается, а, наоборот, увеличивается, стремясь к некоторому оптимальному значению, зависящему от конкретных условий трения. Кривые, показывающие наличие оптимальной высоты неровностей, приведены на рис. 5.25. Оптимальные значения шероховато-

стей соответствуют точкам O_1 и O_2 . Более тяжелые условия эксплуатации машин смещают кривую износа вправо и вверх, а точку оптимальной шероховатости – в сторону увеличения высоты неровностей.

Увеличение высоты неровностей по сравнению с оптимальной обусловлено смятием, срезом и скалыванием неровностей. С уменьшением высоты неровностей по сравнению с оптимальной уменьшается маслосъемность зоны контакта, ухудшается смачиваемость трущихся поверхностей. При этих условиях работы деталей смазка выдавливается из зоны контакта и наблюдается молекулярное сцепление и заедание трущихся пар.

При проектировании машин конструктор должен назначать оптимальную высоту шероховатости трущихся поверхностей, при которой износ и коэффициент трения при заданных условиях работы будут наименьшими. Однако решить эту задачу конструктор не может из-за отсутствия рекомендаций по выбору оптимальной высоты шероховатости.

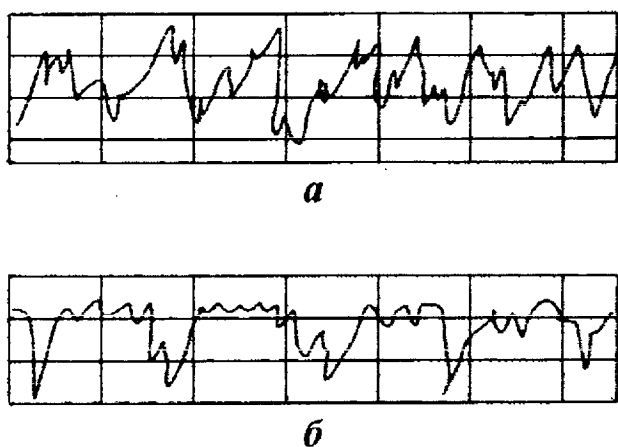


Рис. 6.3. Профилограммы поверхности деталей 10-го класса шероховатости обработанных: *a* – шлифованием; *б* – шлифование с последующим алмазным выглаживанием (вертикальное увеличение $\times 1000$, горизонтальное увеличение $\times 200$)

Износ трущихся поверхностей зависит не только от высоты шероховатостей, но и от формы и направления неровностей.

Показанные на профилограммах (рис. 6.3) шероховатости одинаковой высоты $Ra = 0,125$ мкм, но полученные различными отделочными методами, отличаются формой неровностей. Шлифованная поверхность (*a*) имеет неровности в форме остроконечных выступов. Для выглаженной поверхности (*б*) характерна сглаженная, округленная форма неровностей. Увеличенная опорная

поверхность обеспечивает лучшие эксплуатационные качества.

Из рис.6.4 видно, что на уровне сечения $p = 0,3$ мкм относительная опорная длина профиля после алмазного выглаживания составляет 55%, а после шлифования – только 17%.

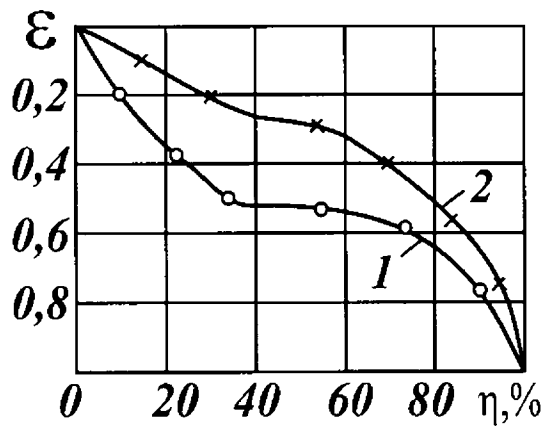


Рис. 6.4. Кривые опорных поверхностей 10-го класса обработанных: 1. Шлифованием; 2. Шлифованием с последующим вытягиванием

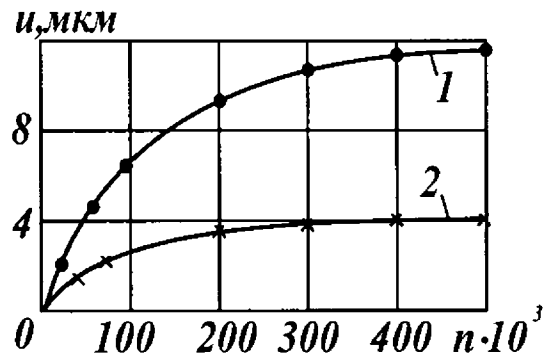


Рис. 6.5. Форма масляного кармана, полученного накаткой на станке (РОТО-ФЛЮ, ФРГ)

Износ шлифованной поверхности значительно больше по сравнению с выглаженной (рис. 6.5). Через $n = 400 \cdot 10^3$ циклов радиальный износ шлифованных образцов из стали 45 ($HRC\ 54 - 56$) составил 11,5 мкм, а износ таких же образцов, но подвергнутых после шлифования алмазному выглаживанию, составил только 4,2 мкм. Шероховатость выглаженной поверхности имеет закругленную форму вершин, значительно большую опорную поверхность и наличие углублений (масляных карманов). Наибольший эффект дают масляные карманы, имеющие закрытую форму с углом подъема лунки менее $1 - 2^\circ$. Такая форма масляных карманов создает гидродинамический эффект в момент запуска и обеспечивает требуемую маслоспособность стыка в процессе работы машины.

Известные и широко используемые на машиностроительных заводах методы нанесения масляных карманов на трущиеся поверхности деталей, не обеспечивают их оптимальной геометрии. Например, известен метод нанесения регулярного микрорельефа виброобкатыванием. В качестве инструмента применяются шариковые вибрационные головки или державки с алмазным наконечником.

Виброголовки с механическим, электромагнитным или пневматическим приводом устанавливаются на суппорт токарного станка. Шарик прижимается к обрабатываемой детали, установленной в центрах, с силой 200 – 400 Н.

В зависимости от требуемого шага и амплитуды осцилляции выбирается число двойных ходов головки и число оборотов заготовки

в минуту. На поверхности детали формируется канавка заданной траектории. Во впадине канавки микротвердость за счет наклепа увеличивается на 15 – 18% по сравнению с исходной твердостью материала $H_{100} = 8000$ МПа и достигает $H_{100} = 9200$ МПа. На вершине напльва микротвердость достигает $H_{100} = 9700$ МПа.

Геометрические параметры профиля канавки для материалов разных марок в сыром и закаленном состоянии представлены в табл. 6.1.

Если напльвы не удалять, то они вызывают в процессе эксплуатации машин задиры на поверхностях деталей и увеличивают их износ. С внутренних поверхностей втулок напльвы можно удалить методом хонингования, а с трущихся поверхностей деталей типа валов только шлифованием.

Т а б л и ц а 6.1. Геометрические параметры профиля канавок

Наименование детали	Диаметр обработанной детали, мм	Материал	Радиус шарика, мм	Высота канавки H_K , мкм	Высота напльва, H_H , мкм
Крутильные кольца	58	Ст45 HRC 30–32	1,9	10	6,0
Корпус суппорта токарного автомата	30	СЧ 32–52	2,0	7,5	4,0
Направляющая втулка	40	СтХ12 HRC 62–63	1,2	1,9	0,53
Калибр	35	СтУ12А HRC 58–60	1,2	3,1	1,27

Следует, однако, иметь в виду, что величина погрешности установки в центрах соизмерима с глубиной масляных карманов. При этих условиях при сошлифовании напльвов, могут быть удалены масляные карманы.

Известна технология нанесения масляных карманов на вторичный вал коробки передач автомобиля ВАЗ2101. На цилиндрические участки вала перед термической обработкой накатываются продольные углубления (масляные карманы) (рис. 6.6).

После термической обработки вала опорные поверхности шеек шлифуют для снятия напльвов вокруг карманов в две операции,

обеспечивая шероховатость $Ra = 0,4$ мкм. Рассмотренные технологические процессы формируют масляные карманы, которые являются резервуарами для подпитки маслом поверхности трения, но не обеспечивают получение гидродинамического эффекта.

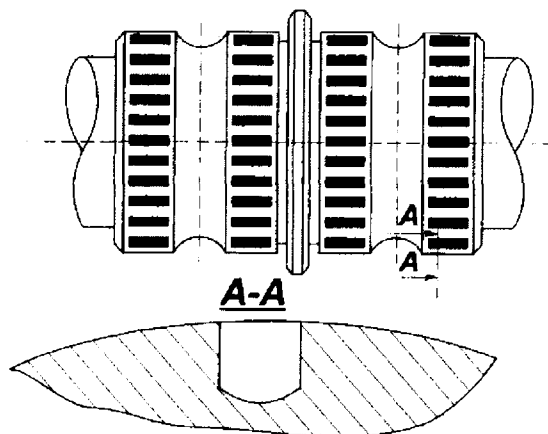


Рис. 6.6. Внешний вид масляных карманов

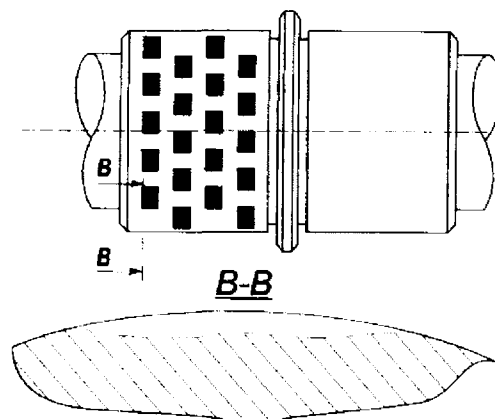


Рис. 6.7. Форма масляного кармана, полученного при шлифовании прерывистым кругом

Для получения гидродинамического эффекта масляные карманы должны иметь закрытую форму с углом подъема не более $1-2^\circ$. Масляные карманы указанной формы можно получить шлифовальным кругом с прерывистой рабочей поверхностью.

Установлено, что шлифование прерывистыми кругами с одним-четырьмя режущими выступами l_1 ($\frac{1}{12} \pi R \leq l_1 \leq \frac{11}{12} \pi R$, где R – радиус круга) при перемещении изделия со скоростью $25 - 100$ м/мин обеспечивает получение масляных карманов требуемой геометрии. Форма масляных карманов представлена на рис. 6.7.

6.5. ФИЗИКА ОТКАЗОВ

Анализ закономерностей, описывающих изменения, происходящие в материалах в процессе эксплуатации машин

Изменения, происходящие в материалах, из которых изготовлены детали изделия, являются одной из главных причин потери его работоспособности. Эти изменения могут привести к повреждению изделия и возникновению отказа. Для выяснения причин потери из-

делием работоспособности необходимо раскрыть физическую сущность необратимых изменений, происходящих в материалах деталей.

Законы превращения связаны с фактором времени. Типичным примером законов превращения являются процессы, связанные с коррозией. Установить закономерность протекания коррозии во времени сложно, так как интенсивность повреждений из-за возникновения коррозии зависит от большого числа факторов, действующих одновременно и в ряде случаев оказывающих противоположное воздействие. Например, при химической коррозии металлов и сплавов, которая возникает при контакте с газами или некоторыми смазками, имеют место окислительные реакции.

Для получения закона старения металла необходимо раскрыть механизм изменения свойств и состояния материала во времени. Закон старения описывает степень повреждения материала в функции времени. Он позволяет прогнозировать ход процесса старения, выявлять наиболее существенные факторы, влияющие на интенсивность протекания процесса. Типичным примером таких зависимостей является закономерность износа материалов.

Изнашивание – это процесс постепенного изменения размеров тела при трении, проявляющийся в отделении с поверхности трения материала (ГОСТ 16429 – 70).

Изнашивание сопровождается процессами коррозии и является сложным физико-химическим процессом. Его изучением занимались многие ученые.

Широко известны работы ученых А.К. Зайцева, Д.В. Кузнецова, И.В. Крагельского, Б.И. Костецкого, М.М. Хрущева, Д.Н. Гаркунова, Ф.Бодена и Д.Тайбора (Англия), Г. Флайшера (Германия), Мак-Грегера, Э. Робиновича (США). Г. Данова (Болгария) и др. В этих работах раскрывается механизм износа материалов и закономерности, определяющие его протекание.

При контакте двух сопряженных поверхностей и их относительном перемещении в поверхностных слоях возникают механические и молекулярные взаимодействия, которые приводят к разрушению соприкасающихся поверхностей, т. е. к их износу.

Из работ проф. И.В. Крагельского [43] известно, что при дискретном касании трущихся поверхностей износ зависит от нагрузки, вида трения, геометрического очертания микронеровностей и физических свойств материала.

Дискретный характер касания и наличие большого числа пятен контакта и, соответственно, фрикционных связей является следствием того, что реальные поверхности имеют сложный рельеф, характеризующийся шероховатостью и волнистостью. Кроме того, поверхностные слои деталей наделены избытком энергии, так как молекулы и атомы, находящиеся у поверхности, имеют свободные связи, которые способствуют возникновению таких явлений, как поглощение, сцепление, прилипание, смачивание и другие виды взаимодействия с веществами внешней среды.

При изготовлении деталей поверхностный слой формируется в условиях больших давлений и высоких температур, которые вызывают ряд побочных явлений, изменяющих физико-химические свойства твердого тела у его поверхности. Физико-механические параметры поверхностного слоя, его структура и напряженное состояние сильно отличаются от свойств глубинных слоев материала. В процессе эксплуатации также идет непрерывное изменение (трансформация) параметров поверхностного слоя. Поэтому большинство отказов машин связано с процессами, протекающими в поверхностных слоях при изготовлении и эксплуатации.

Поверхностный слой с геометрической точки зрения представляет собой довольно сложную картину. На работоспособность деталей влияют не только основные характеристики волнистости (высота волны H и ее шаг t) и шероховатости (Rz , Ra , средний шаг S и максимальная высота неровности R_{max}), но и форма неровностей, их направление и другие параметры микрорельефа. На поверхности часто обнаруживаются отдельные дефекты в виде трещин, сколов, царапин и других локальных отклонений от установившегося рельефа.

Наконец, специфической особенностью поверхностного слоя является возникновение в нем внутренних временных и остаточных напряжений. Внутренние напряжения возникают в процессе нагрева и охлаждения детали и проявляются в виде микронапряжений, охватывающих крупные объемы детали (напряжения 1-го рода), микронапряжения в пределах одного или нескольких кристаллических зерен (напряжения 2-го рода) и субмикроскопических напряжений, действующих между элементами кристаллической решетки (напряжения 3-го рода). Оно, как правило, является следствием определенного технологического процесса, поэтому различают литейные, сварочные, закалочные, шлифовочные и другие остаточные напряжения.

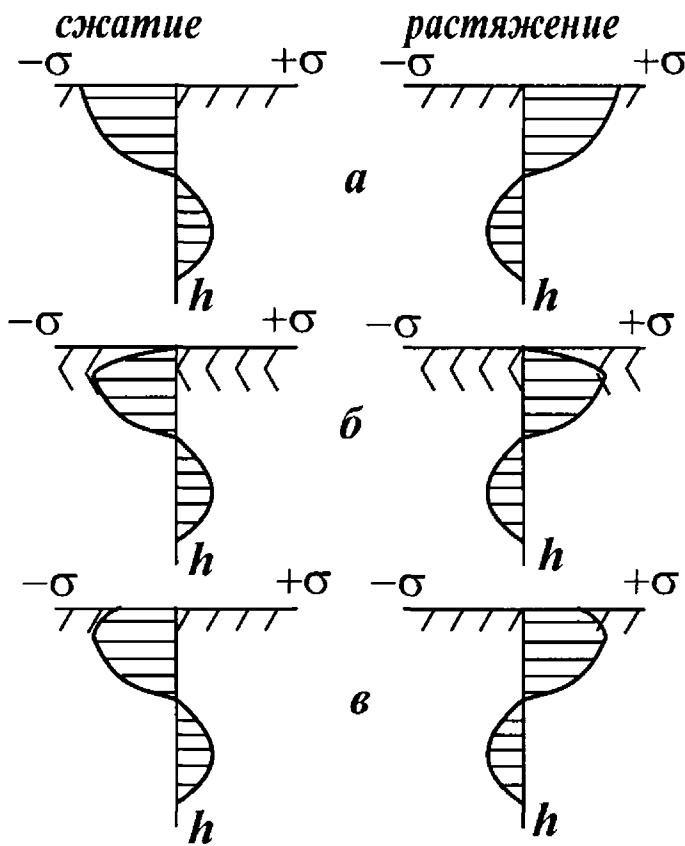


Рис. 6.8. Эпюры остаточных напряжений

(вызывающий состояние ползучести) и силовой (пластическую деформацию) – действуют одновременно, то знак остаточного напряжения в наружном слое зависит от того, какой из этих факторов превалирует.

При шлифовании в поверхностном слое возникают растягивающие напряжения, здесь доминирующую роль играет тепловой фактор. При фрезеровании и точении в зависимости от скорости резания могут возникать растягивающие (при больших скоростях) и сжимающие (при малых скоростях) напряжения.

После упрочняющей технологии, закалки ТВЧ, азотирования, цементации возникают сжимающие напряжения. После нанесения гальванических покрытий или при обезуглероживании поверхности стальных деталей в поверхностном слое возникают остаточные напряжения растяжения (рис. 6.8, а, справа). При нанесении защитных покрытий гальванотермическим методом, а также при диффузионном отжиге детали с гальваническим покрытием на границе раздела покрытие – подложка возникают максимальные сжимающие напряжения (рис. 6.8, б). При химико-термической обработке сталей с обезуг-

На рис. 6.8 приведены типичные эпюры остаточных напряжений 1-го рода. Наибольшие напряжения у поверхности могут быть как сжимающие (левый столбец), так и растягивающие (правый столбец) (рис.6.8, а). Максимальные напряжения могут располагаться на некоторой глубине от поверхности (у поверхности они равны нулю) (рис. 6.8, б) или имеют вид, показанный на рис. 6.8, в. Разнообразие эпюр напряжений зависит от силовых и температурных воздействий. Так как оба фактора – температурный

лероженным слоем на границе раздела возникают максимальные растягивающие напряжения (рис.6.8, б, справа). Иногда вследствие релаксационных процессов наибольшие значения сжимающих и растягивающих остаточных напряжений смещаются от поверхности на некоторую глубину.

В процессе механической обработки в поверхностном слое деталей происходит искажение кристаллической решетки, изменяется форма и размер зерен, образовывается текстура. Пропорционально степени пластической деформации уменьшается плотность материала, увеличивается количество дислокаций и вакансий, повышается за счет наклепа твердость и уменьшается пластичность.

Изменение физико-механических свойств материала поверхностного слоя связаны не только с упрочнением и разупрочнением, а и с окислительными процессами. Например, при шлифовании углеродистой стали в поверхностном слое возникают обезуглероженные участки, а на самой поверхности образуются тонкие окисные пленки.

Наличие окисных пленок на поверхности облегчает диффузию кислорода и его взаимодействие с металлом. Пластически деформированный и насыщенный кислородом слой под действием циклических нагрузок хрупко разрушается, охватывая более глубокие слои.

Вследствие теплового и силового воздействия на поверхностный слой детали со стороны инструмента в нем возникают остаточные напряжения как комплекс процессов пластического течения материала и объемных изменений структурных составляющих материала.

6.6. НАДЕЖНОСТЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ИЗГОТОВЛЕНИЯ МАШИН

Технологический процесс – это сложная динамическая система, в которой в единый комплекс объединены оборудование, средства контроля и управления, транспортные устройства, обрабатывающий инструмент и, наконец, люди, осуществляющие процесс или управляющие им. Для выполнения поставленных задач технологический процесс должен обладать высокой надежностью. Технологический процесс изготовления должен обеспечить требуемый уровень качества и высокую производительность. Однако, эти две стороны нередко вступают в противоречие – повышение производительности может привести к снижению качества и, наоборот, более высокое качество может быть получено за счет низкой производительности.

Поэтому надежность технологического процесса изготовления машин должна быть обеспечена как по качественным, так и по количественным показателям.

Свойство надежности технологического процесса отличается от понятия точности и стабильности. Согласно ГОСТу 16949 – 71, под точностью понимается способность технологического процесса обеспечивать соответствие поля рассеивания значений показателя качества изготовления продукции заданному полю допуска и его расположению.

Стабильность – свойство технологического процесса сохранять показатели качества изготавливаемой продукции в заданных пределах в течение некоторого времени. Из определения следует, что точность характеризует технологический процесс в некоторый фиксированный момент времени, т. е. в статике. Надежность технологического процесса – понятие динамическое.

Понятие стабильности характеризует технологический процесс изготовления машин только с позиции сохранения в заданных пределах показателей качества продукции, не затрагивая вопросов об изменении с течением времени производительности.

Технологический процесс может быть стабильным, но иметь низкую надежность. С другой стороны, технологический процесс может обладать высокой надежностью, хотя получаемая при его реализации продукция будет относиться к низкой категории качества или морально устаревшая.

Рассмотрим оценку надежности технологического процесса, состоявшего из n последовательных операций. Технологический процесс обеспечивает m параметров $x_1, x_2, x_3, \dots, x_m$ в пределах заданных допусков. Вероятность $p(t)$ выхода любого из параметров за пределы допуска в течение заданного периода времени $t = T$ определяет безотказность данного технологического процесса. Выходные параметры формируются в результате последовательной обработки на операциях $1, 2, \dots, n-1, n$. Вероятность осуществления технологического процесса на всей цепочке должна быть равна произведению вероятностей $p_i(t)$ отдельных операций

$$p(t) = p_1 \cdot p_2 \cdot \dots \cdot p_n = \prod_{i=1}^n p_i \cdot$$

Технологические процессы с большим количеством операций имеют низкую надежность. Например, если технологический процесс состоит из 50 операций, а вероятность выхода параметров обрабатываемой детали за пределы допуска на каждой операции составила $P_i(t)=0,99$, то вероятность обеспечения точности в конце обработки будет равна

$$P_{\Sigma}(t) = (0,99)^{50} \cong 0,55.$$

Однако в реальных технологических процессах формирование выходных качественных параметров происходит в основном на последних (финишных) операциях, а контролируемые параметры промежуточных операций существенной роли на окончательный результат не оказывают. Качественные параметры деталей машин формируются на финишных операциях. Наиболее распространенной финишной операцией является шлифование, которое обеспечивает достаточно высокую точность, но с его применением связывают появление на поверхности шлифовочных дефектов (прижогов и трещин).

Из опыта эксплуатации машин известно, что наличие прижогов, например, на боковых поверхностях зубьев шестерен, снижает долговечность их работы в 5 – 8 раз; наличие прижогов на режущих кромках матрицы и пуасона вырубных штампов, снижает их стойкость в 20 – 30 раз.

Проблема обеспечения заданного качества поверхностного слоя деталей при шлифовании решается путем подбора условий и режимов обработки. Процесс шлифования протекает в непрерывно изменяющихся условиях взаимодействия инструмента с обрабатываемым материалом в зоне резания, которые в целом характеризуют нестабильность процесса обработки во времени. Это оказывает негативное изменение теплового и силового взаимодействия на инструмент, вызывает нерациональное использование его ресурса и ухудшает качество поверхностного слоя обрабатываемых деталей. Интенсивность отмеченных процессов зависит от динамических свойств технологической системы и технологических условий обработки и в наибольшей степени проявляется при обработке деталей из труднообрабатываемых материалов. Особую актуальность динамическая нестабильность процессов шлифования приобретает в условиях автоматического производства.

При изменении процессов обработки изменяются и оптимальные значения параметров режима. При оптимальном управлении процессом шлифования при непрерывно изменяющихся условиях обработки требуется не только обеспечить заданную точность траектории перемещения инструмента, но также осуществить непрерывное управление параметрами режима шлифования.

Нестабильность характеристик шлифовальных кругов и изменение их в процессе обработки, а также изменение припуска на отдельных участках заготовки и многие другие переменные факторы приводят к неконтролируемым изменениям тепловой и силовой нагрузки на инструмент. Для стабилизации качественных параметров необходимо поддерживать на заданном уровне мощность, затрачиваемую на резание, за счет изменения глубины шлифования или продольной подачи, или величины упругих деформаций системы. Однако указанные способы управления обеспечивают стабилизацию мощности шлифования только на последнем проходе. В реальных условиях шлифования съём припуска производится за несколько проходов. Причем на предварительных проходах возникающий дефектный слой может проникнуть на такую глубину, что последующие проходы не позволят удалить дефектный слой.

Следовательно, удаление припуска при многопроходном шлифовании следует производить с уменьшающимися от прохода к проходу глубинами. Причем глубина дефектного слоя, возникающая при шлифовании, не должна превышать величину припуска, оставшегося на последующие проходы.

6.7. ОПТИМАЛЬНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПРИПУСКА ПО ПРОХОДАМ

Для получения требуемого качества поверхностного слоя, точности размеров и формы оптимальный цикл обработки нужно строить таким образом, чтобы интенсивность съема материала уменьшалась к концу цикла. При этом речь идет о фактической интенсивности съема припуска, так как за счет упругих деформаций значения фактических глубин отличаются от номинально установленных по нониусу станка.

Глубина проникновения шлифовочного дефекта $\delta_{\text{изм}}$ зависит от условий шлифования, режимов, состояния рабочей поверхности круга.

В общем случае выражение для $\delta_{\text{изм}}$ можно записать в виде

$$\delta = C_1 V_d^x S^y t^k \tau^z, \quad (6.4)$$

где C_1, x, y, k, z – постоянные коэффициенты.

Экспериментально установлено, что независимо от сочетания скорости V_d и подачи S глубина дефектного слоя δ пропорциональна глубине шлифования t [65].

В табл. 6.2 представлены режимы шлифования зубчатых колес, температура в зоне контакта и глубина дефектного слоя [65].

Т а б л и ц а 6.2

Модель станка	Глубина резания, мм	Поперечная подача	Продольная подача	τ , с	$\theta^\circ\text{C}$	δ , мкм
5851 $\alpha_n=0$	0,03	1,67 мм/кач	93 кач/мин	0,003	501	18-25
	0,05			0,0037	719	35-45
	0,07			0,0043	918	60-70
5851 $\alpha_n=15^\circ$	0,03	1,67 мм/кач	93 кач/мин	0,0215	490	58-65
	0,05			0,0286	591	90-100
	0,07			0,0326	870	130-145
5831	0,03	1,27 мм/кач	100 кач/мин	0,034	557	75-80
	0,05			0,039	620	130-135
	0,07			0,043	665	150-170

Из приведенных данных следует, что с увеличением времени воздействия теплового источника возрастает глубина дефектного слоя.

На основании данных, приведенных в табл. 6.2, построена зависимость глубины дефектного слоя δ от глубины шлифования зубчатых колес на станке 5851 с $\alpha_n = 0$ (кривая 1) и $\alpha_n = 15^\circ$ (кривая 2) и на станке 5831 (кривая 3) (рис.6.9). Штриховой линией представлена зависимость удельного съема металла от глубины шлифования. Расчеты произведены для шлифования зубчатых колес на станке 5851 с нулевой исходной режущей рейкой кругов ($\alpha_n = 0$) на режиме $S_{\text{поп}} = 1,67$ мм/ход; $V_{\text{обк}} = 38,87$ мм/с и на станке 5831 на режиме $S_{\text{кр}} = 1,27$ мм/ход, $V_{\text{и}} = 51,2$ мм/с.

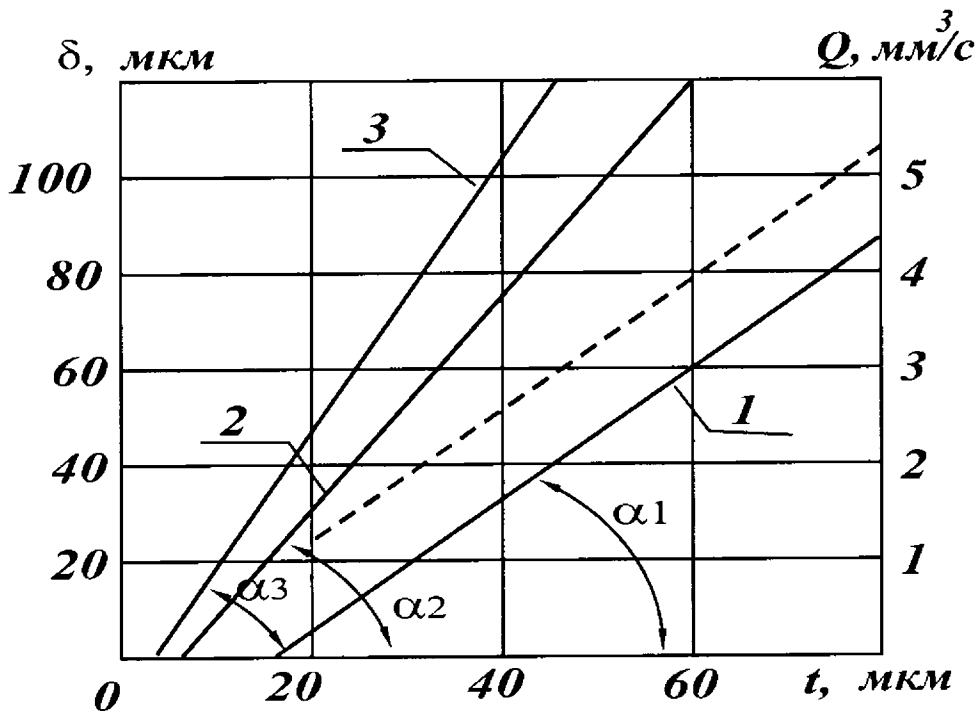


Рис. 6.9. Зависимость глубины дефектного слоя δ от глубины шлифования: 1. Станок 5851 $\alpha_u = 0$; 2. Станок 5851, $\alpha_u = 15^\circ$; 3. Станок НАИЛС (5831)

Из анализа зависимостей $\delta = f(t)$ (рис.6.9) видно, что дефектный слой при шлифовании зубчатых колес ($m=5, z=30, \alpha=20$ сталь 12Х2Н4М) появляется при глубине резания t_0 . Рассматриваемые схемы зубошлифовальных станков имеют различные значения начальных глубин t_0 .

Например, при шлифовании зубчатых колес на станке 5831 дефектный слой начинает появляться при глубине резания $t_0 = 0,005$ мм, при шлифовании на станке 5851 с 15-ти градусной настройкой кругов – $t_0 = 0,008$ мм, а при шлифовании на станке 5851 с $\alpha_u = 0$, $t_0 = 0,012$ мм.

Величину дефектного слоя можно рассчитать по формуле

$$\delta = (t - t_0)tg\alpha, \quad (6.5)$$

где δ – величина дефектного слоя, мкм; t – глубина шлифования, мкм; t_0 – глубина шлифования, при которой начинают появляться дефекты, мкм; $tg\alpha$ – параметр, характеризующий влияние кинематики станков на теплонапряженность процесса шлифования.

Например, для условий шлифования, приведенных в табл. 6.2, для зубошлифовального станка 5851 с $\alpha_n = 0^\circ$ — $tg\alpha_1 = 1,14$, для зубошлифовального станка 5851 $\alpha_n = 15^\circ$ — $tg\alpha_2 = 2,18$, для зубошлифовального станка 5831 — $tg\alpha_3 = 2,78$.

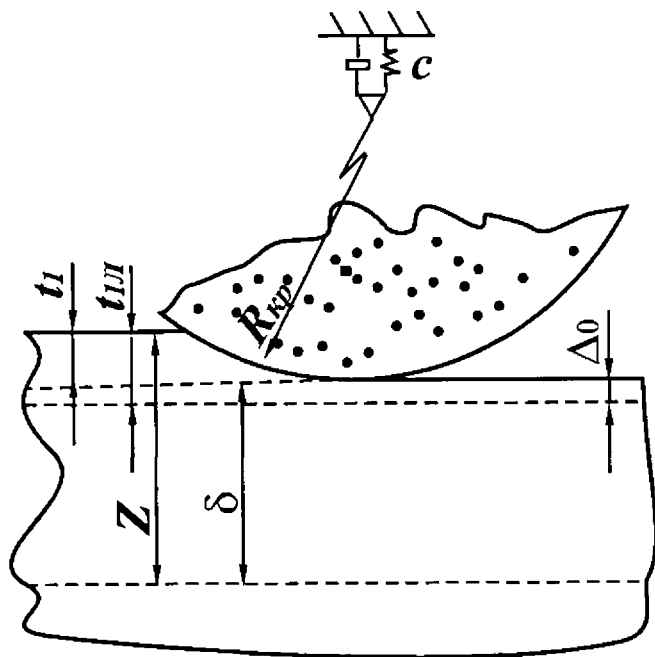


Рис. 6.10. Расчетная схема для определения глубины дефектного слоя

Для устранения шлифовочных дефектов необходимо удаление припуска производить с таким расчетом, чтобы дефектный слой от предыдущего прохода не превышал оставшийся припуск на последующую обработку (рис. 6.10). Например, при выполнении равенства (6.5) глубина дефектного слоя не должна превышать оставшийся припуск под последующую обработку

$$t_1 + tg\alpha(t_1 - t_0) = z, \quad (6.6)$$

где t_1 — глубина резания на первом проходе; z — общий припуск на шлифование.

Глубина резания на первом проходе будет равна

$$t_1 = \frac{z + t_0 tg\alpha}{1 + tg\alpha}. \quad (6.7)$$

Глубина резания на i проходе

$$t_i = \frac{\left(z - \sum_{i=1}^{n-1} t_i \right) + t_0 tg\alpha}{1 + tg\alpha}. \quad (6.8)$$

Рассмотрим последовательность расчета операционных припусков на конкретном примере.

Пример. Требуется удалить с боковых поверхностей зубьев припуск $z = 0,2$ мм. Станок 5851, $\alpha_n = 0$ ($t_0 = 0,012$ мм, $tg\alpha = 1,4$) $S_n = 1,67$ мм/кач, число качаний стола $n = 93$ кач/мин. По формуле (6.8) производится расчет t_i до тех пор, пока не будет выполнено условие $t_n \leq t_0$

$$t_1 = \frac{z + t_0 tg\alpha}{1 + tg\alpha} = 0,094 \text{ мм},$$

$$t_2 = \frac{z - t_1 + t_0 tg\alpha}{1 + tg\alpha} = 0,05 \text{ мм},$$

$$t_3 = \frac{z - (t_1 + t_2) + t_0 tg\alpha}{1 + tg\alpha} = 0,027 \text{ мм},$$

$$t_4 = \frac{z - (t_1 + t_2 + t_3) + t_0 tg\alpha}{1 + tg\alpha} = 0,014 \text{ мм},$$

$$t_5 = \frac{z - (t_1 + t_2 + t_3 + t_4) + t_0 tg\alpha}{1 + tg\alpha} = 0,007 \text{ мм}.$$

Полученное распределение глубин шлифования обеспечивает стабилизацию качества поверхностного слоя, т. е. устраняет появление шлифовочных дефектов.

На пятом проходе условие $t_5 < t_0$ выполняется. Следовательно, дальнейшую обработку можно было бы прекратить, если суммарная величина снятого слоя металла за 5 проходов достигла величины общего припуска на обработку $z = 0,2$. Однако величина суммарного

съема металла $\sum_{i=1}^5 t_i = 0,192$ мм оказалась меньше величины общего

припуска $z = 0,2$ мм. Поэтому для удаления оставшейся части общего

припуска $z_{\text{ост}} = z_{\text{общ}} - \sum_{i=1}^n t_i = 0,2 - 0,192 = 0,008$ мм необходимо на-

значить дополнительный шестой проход. С глубиной $t_6 = 0,008$ мм.

Под действием сил резания происходит деформация шпиндельного узла шлифовального станка. В результате фактический (расчетный) съем металла будет отличаться от глубины шлифования, установленной по нониусу станка

$$t = t_n - \Delta_0, \quad (6.9)$$

где t – фактический съем металла (расчетный); t_n – лимбовая глубина шлифования; Δ_0 – величина смещения круга в направлении нормали к кругу.

Величину Δ_0 можно определить из выражения [47]

$$\Delta_0 = \frac{k_0}{c_{\text{ж}} + k_0} \cdot t_n, \quad (6.10)$$

где $c_{\text{ж}}$ – статическая жесткость упругой системы шпиндельного узла, Н/мм; k_0 – динамическая жесткость, характеризующая силу резания, приходящуюся на единицу глубины внедрения шлифовального круга в металл, Н/мм.

В технологических картах технолог указывает лимбовые глубины. После подстановки выражения (6.10) в (6.9) и некоторых преобразований получена формула для определения лимбовых глубин шлифования

$$t_{\text{л}} = \frac{t}{1 - \frac{k_0}{k_0 + c_{\text{ж}}}}. \quad (6.11)$$

Для зубошлифовального станка 5851 жесткость шпиндельного узла $c_{\text{ж}} = 7000$ Н/мм, динамическая жесткость определяется по формуле $k_0 = c_{\text{ж}} \left(\frac{t_{\text{л}}}{t} - 1 \right)$ и $k_0 = 4666$ Н/мм.

Лимбовые глубины шлифования для станка 5851 с $\alpha_{\text{н}} = 0^\circ$ согласно произведенному расчету равны $t_{1\text{л}} = 0,157$ мм, $t_{2\text{л}} = 0,083$ мм, $t_{3\text{л}} = 0,045$ мм, $t_{4\text{л}} = 0,023$ мм, $t_{5\text{л}} = 0,011$ мм, $t_{6\text{л}} = 0,013$ мм.

В табл.6.3 представлены значения фактических и лимбовых глубин шлифования зубчатых колес ($m = 5$, $z = 30$, $\alpha = 20^\circ$, сталь

12X2H4A HRC 60 – 62) на различных зубошлифовальных станках. Общий припуск $z = 0,2$ мм.

Т а б л и ц а 6.3

№ прохода	5851 $\alpha_{и} = 0$		5851 $\alpha_{и} = 15^\circ$		5831	
	$C_{ж}, Н/мм$	$K_0, Н/мм$	$C_{ж}, Н/мм$	$K_0, Н/мм$	$C_{ж}, Н/мм$	$K_0, Н/мм$
	7000	4666	7000	4666	10000	6500
	Глубина шлифования, мм		Глубина шлифования, мм		Глубина шлифования, мм	
t	$t_{л}$	t	$t_{л}$	t	$t_{л}$	
1	0,0942	0,157	0,068	0,111	0,042	0,069
2	0,050	0,083	0,045	0,074	0,030	0,049
3	0,027	0,045	0,032	0,052	0,022	0,036
4	0,014	0,023	0,022	0,036	0,0166	0,027
5	0,007	0,011	0,008	0,013	0,0122	0,020
6	0,008	0,013	0,008	0,013	0,009	0,015
7			0,008	0,013	0,0066	0,011
8			0,007	0,011	0,005	0,008

Рассмотренная методика распределения припуска по проходам может быть использована на этапе проектирования операции зубошлифования (при оптимизации режимов) и на этапе механической обработки (при диагностике операции). Однако данная методика распределения припуска по проходам, основанная на конкретных данных, полученных из эксперимента [65], не позволяет сделать обобщение для всего диапазона режимов и схем шлифования. Для получения более обобщенной математической модели необходимо установить функциональную связь параметров t_0 и $tg\alpha$ с режимами шлифования. Для определения функциональных связей параметров t_0 и $tg\alpha$ с режимами необходимо решить дифференциальное уравнение теплопроводности и найти закон изменения температуры от времени, т. е. $T(x, \tau)$. Затем полученную зависимость приравнять к величине критической температуры $T(x, \tau) = T_{кр}$, где x – глубина распространения температуры $T_{кр}$, при которой начинается распад мартенситной структуры.

Задача определения $x_{кр}$ в явном виде не решается по причине трансцендентности решения этого уравнения.

Зависимость глубины $x_{кр}$ от плотности теплового потока q и времени воздействия теплового источника τ установлена в работе [30] в виде следующей структурной формулы

$$x_{кр} = \delta_d = \alpha_1 q (\tau - \tau_0)^{\beta_1}, \quad (6.12)$$

где α , β – коэффициенты, зависящие от теплофизических параметров обрабатываемого материала; τ_0 – фиксированная величина времени воздействия теплового источника, при которой температура в зоне контакта достигает критической величины (при $\tau \geq \tau_0$ происходит распад мартенситовой структуры, т. е. появляется прижог – дефектный слой).

Максимальная температура на поверхности в зоне шлифования, т. е. при $x = 0$ в соответствии с решением одномерного дифференциального уравнения теплопроводности, описывается уравнением [32]

$$T = \frac{2q}{\lambda} \sqrt{\frac{a\tau}{\pi}}, \quad (6.13)$$

где a , λ – температуро- и теплопроводность обрабатываемого материала.

Из уравнения (6.13) при $T = T_{кр}$ получим

$$\tau = \tau_0 = \frac{T_{кр}^2 \lambda^2 \pi}{4q^2 a}. \quad (6.14)$$

Максимальное время воздействия теплового источника τ равно отношению длины дуги контакта теплового источника к скорости его перемещения. Например, при плоском шлифовании

$$\tau = \frac{\sqrt{Dt}}{V_{ст}}, \quad (6.15)$$

где D – диаметр шлифовального круга; t – глубина шлифования; $V_{ст}$ – скорость стола станка.

Плотность теплового потока q определяется по формуле

$$q = \frac{p\psi}{S}, \quad (6.16)$$

где S – площадь контакта; p – мощность, затрачиваемая на шлифование; ψ – коэффициент тепловвода.

Для плоского шлифования

$$q = \frac{P\psi}{\sqrt{Dt} \cdot S_{\Pi}},$$

где S_{Π} – поперечная подача или ширина полосы шлифования. С учетом уравнений (6.12) и (6.16) получена формула

$$\delta_{\text{д}} = \alpha \frac{p\psi}{\sqrt{D \cdot t} \cdot S_{\Pi}} \left(\frac{\sqrt{D \cdot t}}{V_{\text{д}}} - \frac{T_{\text{кр}}^2 \lambda^2 \pi D \cdot t (S_{\Pi})^2}{\psi^2 4 P^2 a} \right)^{\beta}. \quad (6.17)$$

Формула (6.17) позволяет рассчитать глубину распространения критической температуры $T_{\text{кр}}$ в зависимости от режимных параметров.

При $\delta_{\text{д}} = 0$ выражение (6.17) преобразуется к виду

$$\frac{\sqrt{D \cdot t}}{V_{\text{д}}} = \frac{\pi T_{\text{кр}}^2 \lambda^2 S_{\text{сп}}^2 D \cdot t}{4 a \psi^2 P^2}. \quad (6.18)$$

Откуда

$$p^2 = \frac{\pi T_{\text{кр}}^2 \lambda^2 S_{\Pi}^2 \sqrt{D \cdot t} V_{\text{д}}}{4 a \psi^2},$$

$$p = \frac{T_{\text{кр}} \lambda S_{\Pi} \sqrt{\pi V_{\text{д}} \sqrt{D \cdot t}}}{2 \psi \sqrt{a}}. \quad (6.19)$$

Известно, что

$$p = c t_0^x S_{\Pi}^y V_{\text{д}}^z. \quad (6.20)$$

Для определения глубины шлифования, при которой не образуется дефектный слой t_0 , необходимо приравнять выражения (6.19) и (6.20) и полученное уравнение решить относительно t_0 .

На основании планирования эксперимента получены значения коэффициентов $c = 7,85 \cdot 10^7$; $x = 0,72$; $y = 0,43$; $z = 0,95$.

После подстановки данных $T_{кр} = 350^\circ C$; $S_{п} = 3,6 \cdot 10^{-3}$ м / ход; $\lambda = 16,7$; $V_{д} = 0,057$ м / с; $D = 0,25$ м; $\psi = 0,8$; $a = 3 \cdot 10^{-6}$ в выражении (6.19) и (6.20), получим

$$t_0 = \left(\frac{T_{кр} \lambda S_{п}^{0,57} \sqrt{\frac{\pi}{a}} \sqrt{D}}{2\psi \cdot c \cdot V^{0,45}} \right)^{2,12}. \quad (6.21)$$

При исходных данных глубина шлифования, при которой не образуются дефекты, равна $t_0 = 7,8 \cdot 10^{-6}$ м.

Из анализа выражения (6.21) следует, что глубина шлифования, при которой не происходят структурные изменения, не является постоянной величиной. Она зависит от марки обрабатываемого материала и режимов шлифования. Например, при $S_{п} = 1,2 \cdot 10^{-3}$ м / ход глубина шлифования $t_0 = 2,1 \cdot 10^{-6}$ м, а при $S_{п} = 3,6 \cdot 10^{-3}$ м / ход $t_0 = 7,8 \cdot 10^{-6}$. Для определения угла наклона прямой $\delta = f(t)$ воспользуемся уравнением прямой, проходящей через две точки

$$y_2 - y_1 = k(x_2 - x_1); \quad (6.22)$$

$$y_2 = \delta_2; y_1 = \delta_1; x_2 = t'; x_1 = t_0,$$

где δ_2 – глубина дефектного слоя, соответствующая глубине шлифования t' , а $\delta_1 = 0$

$$k = \operatorname{tg} \alpha = \frac{\delta_2}{t' - t_0}. \quad (6.23)$$

Последовательность расчета глубин резания при оптимальном распределении припуска по проходам:

1. Определяется мощность, затрачиваемая на резание по формуле

$$p' = ct_1^x S_{\Pi}^y V^z. \quad (6.24)$$

Постоянные коэффициенты c, x, y, z определяются экспериментально.

2. По формуле (6.21) определяется глубина шлифования t_0 , при которой не возникает появления структурных изменений.

3. Определяется глубина резания $t' = 10 \cdot t_0$.

4. Определяется интенсивность теплового потока, соответствующая глубине резания t'

$$q' = \frac{\psi p'}{\sqrt{D \cdot t' S_{\Pi}}}, \quad (6.25)$$

где p' – мощность, затрачиваемая на резание при глубине шлифования t' .

5. Определяется глубина дефектного слоя, соответствующая глубине шлифования t' .

$$\delta'_2 = \alpha \frac{p' \cdot \psi}{\sqrt{D \cdot t' \cdot S_{\Pi}}} \left[\frac{\sqrt{D \cdot t'}}{V_d} - \frac{T_{кр}^2 \lambda^2 \pi D \cdot t' \cdot S_{\Pi}^2}{4 P'^2 \psi^2 a} \right]^{\beta}. \quad (6.26)$$

6. Определяется угол наклона прямой изменения глубины пространства дефектного слоя δ от глубины шлифования t

$$tg\alpha_1 = \frac{\delta'_2}{t' - t_0}. \quad (6.27)$$

7. По формуле $t_i = \frac{z - \sum_{i=1}^{n-1} t_i + t_0 tg\alpha}{1 + tg\alpha}$ определяются глубины t_i .

Циклы по определению глубин шлифования t_1, t_2, \dots, t_n повторяются до тех пор, пока не будет выполнено условие $t_n \leq t_0$.

8. Определяется оставшийся припуск $z_0 = z_{общ} - \sum_{i=1}^n t_i$.

Если оставшийся припуск $z_0 \leq t_0$, то назначается дополнительный проход $n+1$ с глубиной шлифования $t_{n+1} = z_0$. Если $z > t_0$, то назначается требуемое дополнительное количество проходов $j = z_0/t_0$ с глубиной резания t_0 .

9. Определяются лимбовые глубины шлифования по формуле

$$t_{ли} = \frac{t_i}{\left(1 + \frac{k_0}{k_0 + c}\right)}$$

В табл. 6.4 представлены расчетные значения технологических параметров (p , q , δ , $tg\alpha$, t и t_0) при шлифовании сталей 12Х2Н4А и Р6М5 на режимах: $T_{кр} = 350^\circ C$; $\alpha' = 1,88 \cdot 10^{-11}$; $\psi = 0,8$; $D = 0,25$ м; $c = 7,85 \cdot 10^7$; $S_{II} = 3,6 \cdot 10^{-3}$ м; $V_d = 0,12$ м/с.

Т а б л и ц а 6.4

Параметры	Ст 12Х2Н4А ($a = 3 \cdot 10^{-6}$; $\lambda = 16,7$)	Ст Р6М5 ($a = 8 \cdot 10^{-5}$; $\lambda = 40$)
p , Вт	499	1425
q , Вт / м ²	$2,5 \cdot 10^6$	$51,7 \cdot 10^6$
δ , м	$29,9 \cdot 10^{-6}$	$45 \cdot 10^{-6}$
$tg\alpha$	0,259	0,40
$t' = 10t_0$, м	$78 \cdot 10^{-6}$	$150 \cdot 10^{-6}$
t_0 , м	$7,8 \cdot 10^{-6}$	$15 \cdot 10^{-6}$

Из анализа полученных данных, приведенных в таблице, видно, что марка обрабатываемого материала оказывает существенное влияние на мощность, затрачиваемую на резание p , интенсивность теплового потока и глубину резания t_0 , которая определяет начало возникновения структурных изменений в материале.

Сталь Р6М5 имеет более высокую теплостойкость по сравнению со сталью 12Х2Н4А, допускает возможность шлифования с более повышенными глубинами, сохраняя при этом исходное состояние структуры. Например, предельно допустимая глубина шлифования, характеризующая начало возникновения структурных изменений стали 12Х2Н4А, равна $7,8 \cdot 10^{-6}$ м, а стали Р6М5 – $15 \cdot 10^{-6}$ м.

Мощность, затрачиваемая на шлифование «Р», характеризует обрабатываемость материала, а величина интенсивности теплового потока характеризует теплонапряженность процесса. Из сопоставления этих параметров видно, что процесс шлифования стали Р6М5 протекает с более высокой теплонапряженностью и со значительно большими энергозатратами по сравнению со сталью 12Х2Н4А.

Расчетные значения точек $A(t'_0, \delta')$ и $B(t''_0, \delta'')$, лежащих на прямых, характеризующих функциональную связь $\delta = f(t)$, использованы для определения угла наклона прямых ($tg\alpha_1$ и $tg\alpha_2$):

$$A_1(7,8; 0) \quad B_1(78; 29,9) \quad A_2(15; 0) \quad B_2(150; 45).$$

В табл. 6.5 представлены расчетные значения глубин шлифования сталей 12Х2Н4А и Р6М5 при послойном удалении общего припуска $z = 0,2$ мм.

Т а б л и ц а 6.5

Режимы шлифования					
12Х2Н4А; $S = 3,6 \cdot 10^{-3}$ м / ход; $tg\alpha = 0,4259$; $t_0 = 7,8 \cdot 10^{-6}$ м; $V_d = 0,12$ м / с.					
Параметры	Проходы				
t_i , мм	0,143	0,042	0,0128	0,00217	
q , Вт / м ²	$13,4 \cdot 10^6$	$15,2 \cdot 10^6$	$20,6 \cdot 10^6$	$20,7 \cdot 10^6$	
p , Вт	360	149,2	83	34,5	
A , Дж / мм ³	6,99	9,88	18,1	43,5	
Режимы шлифования					
12Х2Н4А; $S = 2,4 \cdot 10^{-3}$ м / ход; $tg\alpha = 0,6553$; $t_0 = 4,8 \cdot 10^{-6}$ м; $V_d = 0,12$ м / с.					
t_i , мм	0,122	0,049	0,0194	0,0077	0,002
p , Вт	230	184	145,9	116,5	82,7
A , Дж / мм ³	5,26	10,43	20,9	42,1	114,9
Режимы шлифования					
Р6М5; $S = 3,6 \cdot 10^{-3}$ м / ход; $tg\alpha = 0,40$; $t_0 = 15 \cdot 10^{-6}$ м; $V_d = 0,12$ м / с.					
t_i , мм	0,147	0,042	0,012		

Из анализа приведенных в таблице расчетных данных видно, что с увеличением угла наклона α и уменьшением глубины t_0 увеличивается количество проходов, необходимых для удаления припуска.

С уменьшением глубины резания t_i от 0,143 мм до 0,00217 мм уменьшается мощность, затрачиваемая на резание, от 360 Вт до 34,5 Вт и возрастает удельная работа шлифования от 6,99 А(дж / мм³) до 43,5 А(дж / мм³).

6.8. ВЫБОР И ОБОСНОВАНИЕ УСЛОВИЙ ОБРАБОТКИ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ СТАБИЛИЗАЦИЮ НАПРЯЖЕННОСТИ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ МАТЕРИАЛА

Традиционные способы шлифования не обеспечивают активного уменьшения величины остаточных напряжений в поверхностных слоях обрабатываемых деталей.

Существующие представления о кинетике формирования остаточных напряжений в поверхностном слое [45] свидетельствуют о том, что для компенсации возникающих напряжений следует на последнем проходе траекторию перемещения режущих зерен направить под углом 90° к траектории перемещения зерен на предыдущем проходе.

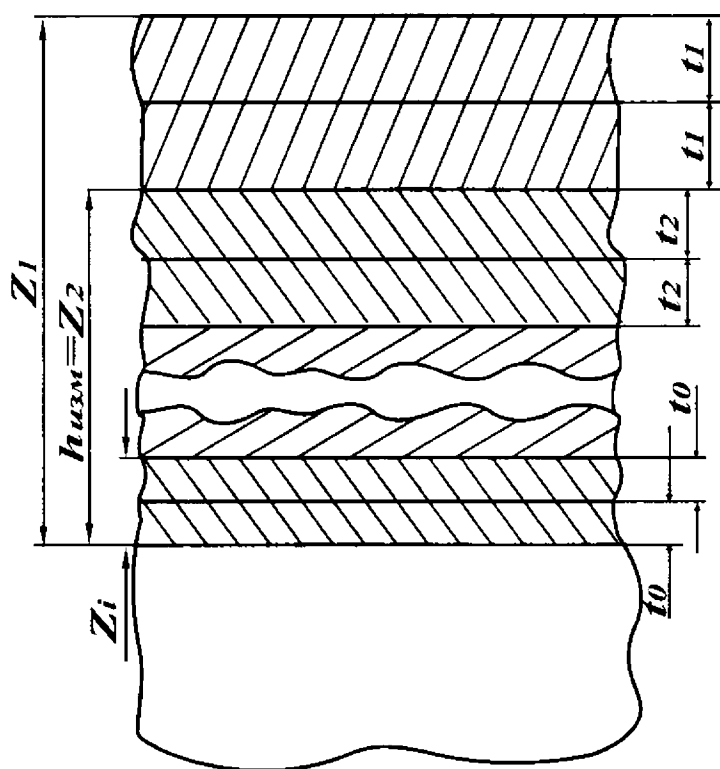


Рис. 6.11. Схема удаления припуска при многопроходном шлифовании

При такой схеме удаления припуска каждый последующий проход перерезает вытянутые и пластически деформированные слои на предшествующем проходе. Перерезание слоев позволяет каждым последующим проходом компенсировать остаточные напряжения по величине и знаку, возникающие на предыдущем проходе. Чтобы исключить

При такой схеме удаления припуска каждый последующий проход перерезает вытянутые и пластически деформированные слои на предшествующем проходе. Перерезание слоев позволяет каждым последующим проходом компенсировать остаточные напряжения по величине и знаку, возникающие на предыдущем проходе. Чтобы исключить

возникновение остаточных напряжений, надо съём припуска выполнять за четное количество проходов, а у каждой пары проходов (предшествующего и последующего) режимы должны быть одинаковыми.

В.И. Свирщевым [44, 45] разработан способ, обеспечивающий компенсацию остаточных напряжений. Сущность способа заключается в периодическом изменении траектории движения формообразующего режущего контура шлифовального круга на предыдущем и последующем проходах.

Для компенсации возникающих напряжений необходимо обеспечить деформацию материала на предшествующем и последующем проходах в двух взаимно перпендикулярных напряжениях.

На рис.6.11 приведена схема удаления припуска при многопроходном шлифовании:

z_1 – общий припуск; z_2 – припуск, оставшийся после удаления первой пары проходов; z_i – припуск, оставшийся после удаления $(i - 1)$ пары проходов

$$z_i = z_1 - 2(t_1 + t_2 + t_3 + \dots + t_{i-1}).$$

Припуски на обработку z_1, z_2, \dots, z_i должны быть равны или больше глубины слоев, в которых произошли структурные изменения материала ($h_{изм1}, h_{изм2}, \dots, h_{изми}$).

В поверхностном слое обрабатываемой детали шлифовочных дефектов не возникает, если выполняется следующее равенство:

$$tg\alpha(t_1 - t_0) = Z_1 - 2t_1. \quad (6.12)$$

Выполняя равенство (6.12) для каждой последующей пары проходов, общее выражение для глубины шлифования примет вид

$$t_i = \frac{\left(z_1 - \sum_{i=0}^{m-1} 2t_i \right) + tg\alpha t_0}{(2 + tg\alpha)}. \quad (6.13)$$

6.9. ВЛИЯНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МАТЕРИАЛА ДЕТАЛЕЙ МАШИН

К деталям машин предъявляются весьма разнообразные требования. Одни детали должны быть очень прочными (валы), другие – и прочными, и твердыми (шарики для шарикоподшипников), третьи – упругими (пружины), четвертые – износостойкими (шестерни), пятые, работающие при сильном нагревании (клапаны двигателей), – должны сохранять высокую прочность при высоких температурах, шестые – не должны подвергаться коррозии от непрерывного соприкосновения с газами и влагой (лопатки газовых турбин реактивных двигателей).

В машиностроении для изготовления деталей машин с требуемыми физико-механическими свойствами применяют металлы, подвергнутые различным видам термической обработки.

Вещества, состоящие из одного элемента – металла, называются металлами. Вещества, состоящие из двух или нескольких элементов, из которых один основной, называются сплавами. Например, обычная сталь – это сплав, состоящий из элемента железа (металла) и элемента углерода (металлоида). Простых металлов немного: их столько же, сколько элементов – металлов в таблице Менделеева – всего 79. Сплавов же насчитывается несколько десятков тысяч. В связи с большим количеством сплавов и непрерывным появлением новых, возникает необходимость их классифицировать.

Наиболее распространенной классификацией является классификация по основному элементу: например, железные сплавы, медные сплавы, алюминиевые сплавы, магниевые, титановые, никелевые, цинковые сплавы и др.

По назначению металлы и сплавы классифицируются на три группы:

1. Конструкционные сплавы общего назначения, из которых изготавливаются самые разнообразные детали машин: оси, валы, кронштейны, болты, шестерни, пружины и другие детали.

2. Конструкционные стали с особыми свойствами: нержавеющей стали, жаропрочные стали и сплавы, антифрикционные (подшипниковые) сплавы и др.

3. Инструментальные сплавы: инструментальные стали и твердые сплавы.

ГОСТом предусмотрено семь основных марок инструментальных, высококачественных, углеродистых сталей: У7А, У8А, У9А, У10А, У11А, У12А и У13А. Буква «У» в обозначении марки стали указывает на то, что эта сталь углеродистая, число, стоящее после буквы «У», показывает десятые доли процента углерода в стали.

Например, в стали марки У8 содержится 0,8% углерода, а в стали У10 – 1%. Буква «А» показывает высококачественную сталь, отличающуюся более низким содержанием фосфора и серы (допускается не более 0,035% фосфора и не более 0,030% серы). Чем больше в инструментальной стали углерода, тем она тверже, но имеет более повышенную хрупкость.

Из стали У7 изготавливают зубила, молотки, штампы, центры токарных станков. Из стали У8 изготавливают штампы для холодной штамповки, ножи. Из стали У10 и У12 изготавливают метчики, сверла, фрезы, планки, развертки и измерительные инструменты: скобы, калибры и др.

Особый интерес среди инструментальных сталей представляют так называемые «быстрорежущие» стали. Эти стали, по сравнению с углеродистыми, обладают более высокой стойкостью перед самопроизвольным отпускком.

В качестве легирующих элементов быстрорежущих сталей, например, Р18 и Р9 используют вольфрам, хром, ванадий. Некоторые марки быстрорежущих сталей легируют также кобальтом. Легирующие элементы, входящие в состав инструментальных сталей, образуют с углеродом карбиды: карбиды вольфрама, карбиды хрома, карбиды ванадия и других элементов. Подобно цементиту, карбиды, обладая весьма высокой твердостью, придают стали высокую твердость, высокую износостойкость и высокие режущие свойства.

Для увеличения производительности обработки необходимо, с одной стороны, увеличить стойкость режущего инструмента, а с другой – с помощью термической обработки улучшить обрабатываемость материала детали. Обрабатываемость стали в очень большой степени зависит от твердости материала детали. Пластичные материалы с малой твердостью и, наоборот, стали, имеющие высокую твердость, имеют плохую обрабатываемость. Для улучшения обрабатываемости применяется термическая обработка – нормализация.

При нормализации заготовки нагреваются до температур порядка 850 – 900 °С, выдерживаются при этой температуре некоторое время, после чего охлаждаются на воздухе. Отжиг производится аналогичным образом, но заготовка охлаждается вместе с печью. Нормализация повышает пластичность стали, улучшает обрабатываемость, устраняет химическую неоднородность и уменьшает напряженность. Для повышения механических свойств стали необходимо прежде всего получить мелкозернистое строение структуры материала. Получение мелкого зерна – это не всегда достаточное, но всегда необходимое условие достижения высоких механических свойств материала деталей. Таким образом, сама по себе мелкозернистая структура не всегда обеспечивает высокие значения физико-механических свойств. Но сталь с крупнозернистой структурой никогда не имеет высоких механических свойств.

Получение мелкого зерна – это неустанная забота металлургов, литейщиков, кузнецов, сварщиков и термистов. Однако в ряде случаев крупнозернистое строение структуры материала более предпочтительно. Например, чем крупнее зерно трансформаторной стали, тем выше ее магнитные свойства. Получение мелкозернистой структуры достигается двумя способами:

1. Пластической деформацией (ковкой, прокаткой и другими видами обработки давлением).

2. Термической обработкой.

Для повышения твердости и прочности материала применяют термическую обработку – закалку. При закалке заготовку нагревают до температуры, при которой углерод переходит в твердый раствор, а затем осуществляют быстрое охлаждение. Чтобы определить уровень нагрева при закалке, необходимо рассмотреть доэвтектоидные и заэвтектоидные стали (рис.5.27).

В доэвтектоидных сталях для получения структуры аустенита необходимо нагреть заготовку на 30 – 50° выше точки A_3 , т. е. выше линии GSK . При закалке заэвтектоидных сталей достаточно нагреть заготовку выше точки A_{C1} (т. е. на 30 – 50° выше линии PK). Нагревом под закалку достигается переход в твердый раствор углерода. При быстром охлаждении достигается такое переохлаждение аустенита, при котором углерод не может выйти из твердого раствора. Такая структура переохлажденного аустенита, которая представляет со-

бой насильственно сохраненный при комнатной температуре твердый раствор углерода в железе, называется мартенситом.

Минимальная скорость охлаждения, необходимая для переохлаждения аустенита до образования мартенситной структуры, называется критической скоростью заковки. Из всех структур мартенсит имеет максимальную твердость и прочность, однако он хрупок и имеет игольчатое строение.

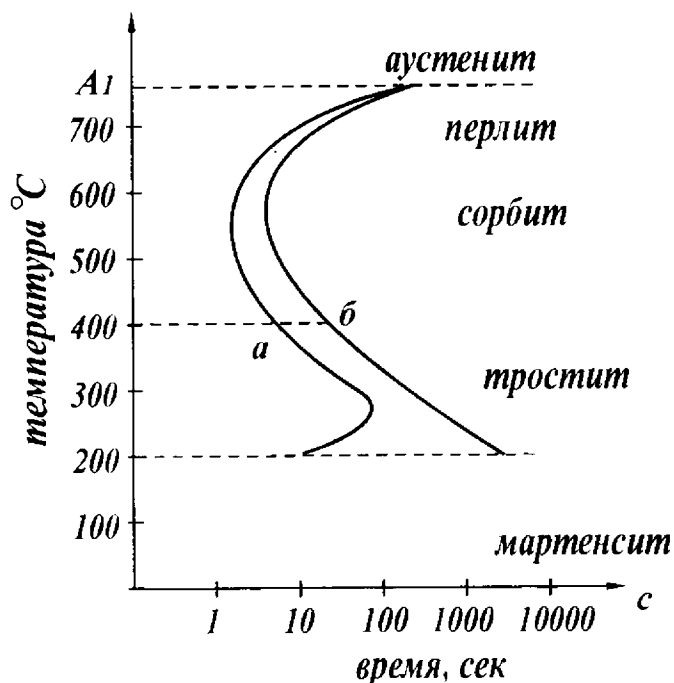


Рис. 6.12. Диаграмма изотермического превращения переохлажденного аустенита стали У8А

Левая кривая на диаграмме показывает начало распада переохлажденного аустенита, а правая — конец распада. Промежуток между ними характеризует продолжительность распада.

Следует обратить внимание, что при температуре 500°C распад переохлажденного аустенита начинается буквально через одну секунду, а при температурах 700°C или 300°C устойчивость переохлажденного аустенита достаточно велика: он не распадается в течение нескольких десятков, а иногда и сотен секунд. Распад аустенита при различных температурах сопровождается различным строением феррито-цементитной смеси. В интервале изменения температур $650 - 700^{\circ}\text{C}$ формируется крупнозернистая феррито-цементитная смесь, называемая перлитом. При температурах порядка 500°C формируется смесь с более мелким строением зерен, которая называется сорбитом.

Если скорость охлаждения стали меньше критической скорости заковки, то образуется смешанная структура мартенсита и мелкодисперсного перлита, который носит название троостита.

На рис.6.12 представлена диаграмма изотермического превращения переохлажденного аустенита в стали У8. Касательная линия, проведенная к левой кривой, определяет критическую скорость охлаждения. Это та наименьшая скорость, при которой в стали получается только один мартенсит.

При более низких температурах (вплоть до температуры M – точки мартенситного превращения) получается очень дисперсная смесь, называемая трооститом). Поверхность детали, которая непосредственно соприкасается с охлаждающей средой, быстро отдает тепло, т. е. охлаждается с большой скоростью. Отвод тепла из глубинных слоев затруднен. Следовательно, по мере удаления слоев от поверхности скорость их охлаждения будет уменьшаться.

Способность стали закаливаться на определенную глубину называется прокаливаемостью. Если деталь прокаливается насквозь, то она будет иметь однородную структуру и одинаковые свойства по всему сечению. Применение углеродистых сталей в ряде случаев ограничивается тем, что они, в отличие от легированных сталей, имеют малую закаливаемость. Следует заметить, что чем меньше критическая скорость закалки, тем глубже прокаливаемость стали.

Для многих деталей и инструментов важно иметь высокую прочность по всему сечению, во всем объеме. К числу таких деталей следует отнести: пружины, валы, штампы и др. Для этих деталей требуется более глубокая прокаливаемость.

Высокая прочность по всему сечению для многих деталей оказывается не только излишней, но даже вредной. Например, боковые поверхности зубьев шестерни должны иметь высокую твердость, так как они работают на истирание и в то же время глубинные слои материала зубьев должны быть достаточно вязкими, так как при работе испытывают ударные нагрузки. Такие детали подвергаются либо высокочастотной поверхностной закалке, либо цементации с последующей закалкой.

6.10. ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА В СТРУКТУРЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА

Детали небольших размеров с твердостью материала $HRC < 35$ подвергаются закалке перед механической обработкой.

Детали больших размеров с твердостью $HRC < 35$ подвергаются закалке после черновой обдирочной операции. Такая последовательность связана с прокаливаемостью крупногабаритных деталей на глубину, соизмеримую с припуском на черновую операцию. Если закалку произвести в заготовке, то львиная доля закаленного слоя будет удалена на черновой обдирочной операции.

Детали, имеющие твердость $HRC \geq 40$ подвергаются закалке после чистового этапа, т. е. после завершения всех операций лезвийными режущими инструментами. Поверхности деталей, имеющие твердость $HRC \geq 60$, закаливаются токами высокой частоты или подвергаются местной химико-термической обработке: цементации и закалке, азотированию, нитроцементированию, борированию.

6.10.1. Цементация

Цементация производится с целью изменения химического состава и свойств поверхностного слоя детали. При цементации происходит диффузное насыщение поверхностного слоя детали углеродом. Процесс цементации применяется для деталей, от которых требуется, наряду с общей прочностью, высокая твердость и износостойкость поверхности. К таким деталям относят шестерни, втулки, кулачковые валики и т. п. Если изготовить, например, зубчатые колеса из углеродистых сталей У10, У12, то высокая твердость и износостойкость боковых поверхностей зубьев в работе будет обеспечена. Но при возникновении ударных нагрузок произойдет поломка. Следовательно, требуется сделать сердцевину колес более вязкой, а боковые поверхности зубьев – более твердыми и износостойкими. Такое сочетание физико-механических свойств на деталях можно осуществить, если изготавливать их из малоуглеродистых сталей с процентным содержанием углерода 0,1 – 0,2 %, а рабочие поверхности подвергнуть цементации с последующей объемной закалкой всей детали. Если надо повысить прочность детали, то применяют легированную сталь с тем же процентным содержанием углерода. Затем поверхность детали насыщается углеродом и производится закалка. В результате поверхность закаливается на высокую твердость, а сердцевина получается прочной и вязкой. Толщина науглероженного слоя при цементации изменяется от 0,8 до 2,0 мм, а содержание углерода в нем 0,8 – 1,2%.

6.10.2. Азотирование

Азотирование – процесс насыщения поверхностного слоя детали азотом. Проникая в атомарном состоянии в деталь, азот образует соединения с элементами, входящими в состав стали: хромом, вана-

дием, титаном, железом и др. Соединения азота с составляющими стали называются нитридами.

Высокая твердость азотированного слоя связана с высокой твердостью нитридов, находящихся в дисперсном состоянии. Простые углеродистые стали мало пригодны для азотирования, так как азотированный слой в них не обладает высокой твердостью и в то же время является чрезмерно хрупким.

Азотированные стали, содержащие нитриды алюминия, имеют наивысшие эксплуатационные показатели, и они не теряют твердости при нагреве до температур $600 - 650^{\circ}\text{C}$. Поскольку азотированный слой стали имеет высокую износостойкость, которая сохраняется при повышенных температурах, то эти стали рационально применять для изготовления гильз цилиндров авиационных двигателей, коленчатых валов и др. Азотирование имеет ряд достоинств по сравнению с цементацией: здесь не требуется закалка, процесс азотирования осуществляется при значительно меньших температурах ($500 - 600^{\circ}\text{C}$ вместо $900 - 950^{\circ}\text{C}$).

6.10.3. Цианирование

Цианирование – это процесс одновременного насыщения поверхностного слоя детали углеродом и азотом. Применяется для деталей, работающих на износ. Содержание углерода в цианированном слое $0,6 - 0,8\%$, т. е. меньше, чем при цементации, однако износостойкость его выше благодаря наличию азота, который образует нитриды.

Цианирование по сравнению с цементацией имеет следующие преимущества:

- 1) продолжительность процесса в несколько раз меньше;
 - 2) вследствие малой выдержки при высокой температуре не происходит рост зерна;
 - 3) на поверхности детали не образуется окислительный слой.
- Процесс протекает при температуре $800 - 850^{\circ}\text{C}$ в течение $50 - 45$ мин.

После цианирования детали подвергаются закалке. Специального нагрева под закалку не требуется. Деталь из цианистой ванны погружается в закалочный бак. После закалки необходим отпуск при температуре $150 - 170^{\circ}\text{C}$.

При жидкостном цианировании детали нагревают в соляной ванне. В состав ванны входит цианистый натрий 50 – 55%, кальцинированная сода 25 – 30%, поваренная соль 15 – 20%.

Газовое цианирование протекает в газовой среде, состоящей из смеси 70 – 80% цементирующего газа и 20 – 30% аммиака. Газовое цианирование, как и жидкостное, осуществляется при низких (550°C) и высоких ($750 - 900^{\circ}\text{C}$) температурах.

6.11. ХИМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ

Химическое никелирование. Покрытие из сплава никель-фосфор может быть получено электрохимическим и химическим способами. Последний основан на выделении металлов из водных растворов их солей.

Химическое никелирование применяется для деталей из стали, чугуна, бронзы, алюминия и его сплавов. Структура покрытия аморфная, метастабильная.

Для увеличения прочности сцепления никелево-фосфорного покрытия с основным металлом производится термическая обработка: нагрев до 200°C с выдержкой до 2 – 3 часов. Термическая обработка снижает остаточные напряжения, которые вызывают отслаивание покрытия от подложки.

Химическое никелирование толщиной 0,1 мм применяется как защитное антикоррозийное покрытие деталей, работающих в агрессивных средах, например, в среде нефтепродуктов (плунжерные пары), так и термостойкое покрытие для деталей, работающих в условиях высоких температур при трении (клапаны двигателей внутреннего сгорания, толкатели, поршневые кольца и т. д.).

Оксидирование. Оксидирование – процесс искусственного образования окисной пленки на поверхности детали. Окисная пленка на поверхностях деталей из черных металлов состоит из мельчайших кристаллов магнитной окиси железа Fe_3O_4 и имеет толщину до 3 мкм, пористое строение и прочное сцепление с подложкой (поверхностью детали). Благодаря структурным особенностям окисная пленка хорошо удерживает смазку, устраняет заедание в паре трения.

Окисную пленку можно получить химической, электрохимической, термической или термомеханической обработкой. Химическая

обработка производится в щелочных и кислотных ваннах при температуре раствора 120 – 150°С продолжительностью до 2 часов.

Электрохимическая обработка заключается в анодном окислении в горячих щелочных растворах окислителей.

Термическое и термохимическое окисление производится путем нагрева изделия в расплавленной селитре. Инструменты из быстрорежущей стали, поршневые кольца, толкатели клапанов и другие окисляют в среде водяного пара.

На алюминии и его сплавах с помощью анодирования получают пленки толщиной от 0,3 мкм до 0,3 мм. Окисные пленки имеют высокую твердость и износостойкость.

Анодирование поршней из алюминиевых сплавов двигателей внутреннего сгорания повышает надежность их работы, уменьшает скорость изнашивания кольцевых канавок. Имеется положительный опыт использования в гидросистемах анодированных цилиндров из алюминиевых сплавов вместо стальных.

Фосфатирование. Фосфатирование – процесс образования на поверхности металла пленки нерастворимых фосфорнокислых солей. Фосфатирование производится химическим способом (в ванне либо в струе раствора) или электрохимическим. Температура ванны для черных металлов не более – 90°С. Фосфатная пленка имеет толщину от 2 до 50 мкм и крупнокристаллическую структуру. Жаростойкость пленки 600 – 650°С, она устойчива в атмосферных условиях и в масляной среде, имеет малую твердость, высокоразвитую пористую поверхность и прочно удерживает смазку.

Имеется положительный опыт фосфатирования поршневых колец двигателей внутреннего сгорания, цилиндрических гильз и втулок крупногабаритных двигателей, шатунов и зубчатых колес. Тонкая фосфатная пленка с последующей пропиткой ее маслом защищает от коррозии гайки, болты и другие крепежные элементы. Фосфатное покрытие используется как подслой для дисульфида молибдена, который увеличивает прочность сцепления и устраняет задиры на поверхности.

Сульфидирование. Сульфидирование – термохимический процесс обработки изделий, изготовленных из сплавов на железной основе, для обогащения их поверхностных слоев серой.

Сульфидирование производят в жидкой, твердой и газовой серосодержащих средах. В зависимости от состава среды, температурного

режима и длительности процесса в поверхностном слое изделия могут образовываться серосодержащие соединения FeS , FeS_2 , FeSO_4 и др. Наибольшая глубина слоя при сульфидировании 0,04 мм. Разновидностью сульфидирования является сульфоцианирование, при котором происходит насыщение поверхности ферросплава серой, азотом и углеродом.

Сульфоцианирование проводят при температуре 540 – 580°C с выдержкой в ванне от 1 до 3 часов. Сульфидный слой и продукты его изнашивания, обладая высокой адсорбционной способностью, ускоряют приработку и предотвращают задиры. Сульфоцианирование позволяет осуществить замену бронзовых тяжело нагруженных подшипников на стальные. Долговечность подшипников увеличивается на 30 – 40%. Испытания показали возможность замены бронзы сульфоцианированным чугуном в червячных колесах, работающих при скорости зацепления около 2 м/с.

6.12. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ДЕТАЛЕЙ

В задачу технологии изготовления машин входит придание материалам и заготовкам заданных свойств. Проблема разработки и подбора материалов для изготовления машин состоит из выбора из числа известных существующих материалов, которые удовлетворяют требуемым условиям работы и изыскания новых материалов.

Способ получения заготовки имеет прямое влияние на износостойкость и общую прочность полученных после обработки деталей. Например, ориентировка волокон в материале детали существенно влияет на ее прочность.

На рис.6.13 показаны прямоугольные образцы из стали ШХ15 [51]. Режимы термообработки: закалка при температуре 850°C, отпуск при 150°C.

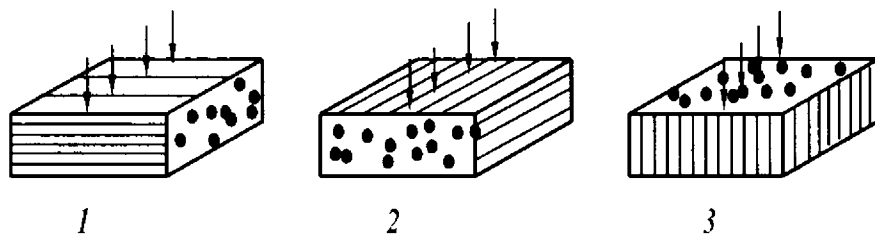


Рис.6.13. Образцы с волокнистой структурой

Волокнистость структуры обусловлена карбидной полосчатостью. Отклонение значений предела прочности при изгибе образцов 1, 2, 3 в порядке их изображения на рис.6.13 составляет 1,0; 0,72; 0,56. Последовательность выполнения операций механической и термической обработки деталей оказывает существенное влияние на их износостойкость.

Установлено [51], что валки холодной прокатки, обработанные по двум вариантам, имеют различную износостойкость.

1-й вариант: обтачивание, закалка с индукционным нагревом, грубое шлифование, чистовое шлифование, полирование до $Ra = 0,16$ мкм.

2-й вариант включает ту же последовательность всех операций, но перед закалкой введена дополнительная операция – шлифование.

Валки, обработанные по 2-му варианту, имеют повышенное сопротивление усталости, более однородную структуру поверхностного слоя материала и меньшую степень понижения твердости структуры от воздействия тепловых процессов при шлифовании.

Опыты показывают, что скорость изнашивания направляющих зависит от сочетания методов обработки сопрягаемых поверхностей. Наибольшую износостойкость имеют пары скольжения, у которых нижние направляющие имеют наклеп от упрочняющей технологии шариками или роликами, а верхние – обработаны шабрением или шлифованием. Выбор способа обработки решается конструктором совместно с технологом. Для увеличения износостойкости деталей автомобильных двигателей применяют антифрикционную безабразивную обработку (АБО).

Сущность данного метода финишной обработки заключается в нанесении механическим путем тонкого слоя латуни, бронзы или меди, используя при этом явление переноса металла при трении.

Толщина антифрикционного слоя латуни, нанесенного на сталь при АБО, равна 2 – 3 мкм, бронзы и меди – 1 – 2 мкм. Детали перед АБО подвергаются шлифованию, точению, развертыванию или хонингованию. Шероховатость поверхности должна быть $Ra = 2,5$ мкм.

Поверхность обезжиривают и покрывают смесью, состоящей из двух частей глицерина и одной части 10-и процентного раствора соляной кислоты. В процессе трения нанесенное покрытие разрушает окисную пленку на поверхности детали, пластифицирует поверхность медного сплава, создает условия для схватывания меди со сталью.

Следует заметить, что существует принципиальная разница в переносе материала при избирательном переносе и при антифрикционной безабразивной обработке (АБО). При избирательном переносе при трении бронзы из ее твердого раствора происходит сепарация атомов меди. Атомы легирующих элементов, растворяясь, переходят в смазочный материал; атомы меди, соединяясь в группы, переходят на сталь. При АБО состав перенесенного металла не отличается от исходного.

Процесс нанесения покрытия производится на токарном станке. В резцодержатель вместо резца закрепляется латунный или бронзовый стержень, который с определенным усилием прижимается к поверхности обрабатываемой детали и перемещается в продольном направлении с определенной подачей.

Метод чрезвычайно прост, не требует сложного оборудования, но стальным и чугунным деталям придает высокие антифрикционные свойства. Данный метод АБО применяется для деталей двигателей внутреннего сгорания, например, цилиндрах и деталях топливной аппаратуры: золотниковые и плунжерные пары. Коэффициент трения снижается в 1,5 раза, износостойкость возрастает в 2 – 3 раза.

6.13. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ С УЧЕТОМ УСЛОВИЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Повышение долговечности и надежности работы деталей и узлов машин – одна из главных народнохозяйственных проблем Украины.

Повысить ресурс и надежность работы деталей можно металлургическими, конструкторскими, технологическими и эксплуатационными мероприятиями. Опыт эксплуатации машин показывает, что наиболее эффективными из них является технологическое направление: обеспечение заданной точности и оптимальных параметров поверхностного слоя детали.

Технологические методы обеспечения оптимальных параметров поверхностного слоя с учетом заданных условий эксплуатации можно разделить на следующие три основные группы: методы деформационного упрочнения, поверхностной термической обработки и образования защитных покрытий. Деформационное упрочнение повышает сопротивление усталости.

Термическая и химико-термическая поверхностно-упрочняющая обработки (закалка, цементация, алитирование, борирование и др.) за счет изменения физико-химического состояния материала поверхностного слоя повышают износостойкость, усталостную прочность, жаростойкость и др. Защитные покрытия повышают жаростойкость, износостойкость и сопротивление коррозии.

6.13.1. Деформационное упрочнение поверхностного слоя

Деформационное упрочнение основано на статическом и динамическом воздействии на поверхностный слой. К числу основных методов деформационного упрочнения относятся: гидро- и виброгалтовка, обработка стальными шариками, колеблющимися с ультразвуковой частотой, обкатка роликами и шариками, алмазное выглаживание. Выбор метода деформационного упрочнения предопределяется прежде всего формой и размерами детали.

Гидрогалтовка. Деформационное упрочнение гидрогалтовкой основано на механическом воздействии рабочей смеси (стальной дроби диаметром 0,6 – 0,8 мм в масле) на обрабатываемую поверхность при их соударении. Наличие масляной пленки создает условия гидравлического удара и жидкостного трения дроби о поверхность детали, что благоприятствует пластическому деформированию тонкого поверхностного слоя при сохранении требуемой шероховатости поверхности. Режим упрочнения гидрогалтовкой определяется экспериментально. Он зависит от многих факторов: материала детали, температуры нагрева ее в условиях эксплуатации, размеров и формы детали и др. Например, лопатки из сплава ВТЗ-1 ротора компрессора обрабатывают с частотой вращения ротора (дробеструйного колеса) 150 об/мин. Продолжительность обработки 30 мин.

После упрочнения обработанная поверхность имеет шероховатость $Ra = 0,6 \div 0,15$ мкм, степень наклепа 20%.

Виброгалтовка. Виброгалтовка производится на инерционных дисбалансных установках, в которых рабочая камера с обрабатываемыми деталями совершает колебательные движения в трех или двух направлениях. При наличии колебательных движений с заданной частотой, стальные шарики, ударяясь о поверхность детали, пластически деформируют поверхностный слой и сглаживают неровности.

Режимы виброгалтовки и продолжительность обработки зависят от материала и технологических требований, предъявляемых к поверхности детали. Например, лопатки из стали ЭИ 9961 обрабатываются на режиме: амплитуда колебаний – вертикальная 2,9 – 3,6 мм, боковая – 1,0 – 1,1 мм, осевая – 0,1 – 0,15 мм; частота колебаний 20 – 30 Гц; продолжительность обработки – 2,5 – 3 часа.

Через каждый час производится реверсирование электродвигателя вибратора. В бункер виброгалтовочной установки помещается до 200 лопаток длиной до 70 – 80 мм. После виброгалтовки шероховатость поверхности равна $Ra = 0,25 \div 0,125$ мкм.

Алмазное выглаживание. Выглаживание является одним из методов отделочно-упрочняющей обработки поверхности пластическим деформированием и заключается в пластическом деформировании обрабатываемой поверхности скользящим по ней алмазным кристаллом, закрепленным на оправке. При обработке неровности, оставшиеся от предшествующей обработки, сглаживаются частично или полностью, повышается твердость и в поверхностном слое создаются сжимающие напряжения.

Особенностью алмазного выглаживания, в отличие от метода обкатки поверхности роликом или шариком, является применение в качестве деформирующего элемента алмаза, который имеет чрезвычайно высокую твердость и низкий коэффициент трения по металлу. Этот метод позволяет обрабатывать все металлы, поддающиеся пластической деформации, – как мягкие, так и закаленные до твердости HRC 60 – 65. Малый радиус закругления инструмента (0,75 – 4 мм) осуществляет выглаживание при малых усилиях прижима алмаза к детали (5 – 20 кгс).

Основными параметрами процесса выглаживания, влияющими на качество поверхностного слоя, являются скорость деформирования и частота приложения нагрузки к каждой точке обрабатываемой поверхности. Среднее давление на площадку контакта, определяющее напряженное состояние поверхностного слоя, зависит от размеров рабочей части инструмента, глубины его внедрения в обрабатываемую поверхность и физико-механических свойств материала.

Степень деформирования зависит от скорости движения инструмента относительно детали и количества нагружения каждой точки обрабатываемой поверхности при выглаживании.

Алмазное выглаживание широко применяется в промышленности при обработке наружных и внутренних цилиндрических поверхностей из металлов и сплавов, поддающихся пластической деформации в холодном состоянии (закаленные и незакаленные стали, цветные металлы, хромированные, никелированные и другие детали). Исключением являются детали из титана, циркония и ниобия, при выглаживании которых наблюдается интенсивное адгезионное схватывание с алмазным инструментом.

Хрупкость алмаза ограничивает область применения процесса выглаживания для упрочнения прерывистых поверхностей, например, деталей со шпоночными канавками, шлицами, поперечными отверстиями и т. д. Прерывистость процесса сопровождается динамическим ударом, вызывающим скол на рабочей поверхности алмаза. Затруднено выглаживание цилиндрических поверхностей с упором в торец.

Выглаживание производят на токарных, токарно-винторезных, расточных, алмазно-расточных, строгальных, вертикально-фрезерных и агрегатных с повышенной точностью станках. При выглаживании обращают особое внимание на величину радиального биения шпинделя (не более 0,01 – 0,02 мм).

Выглаживание производится при скорости 150 – 200 м/мин с обильной подачей смазочно-охлаждающей жидкости.

Выглаженные поверхности отличаются зеркальным блеском, микротвердость увеличивается, например, калибров из стали У10А с $H_{100} = 8320$ МПа до $H_{100} = 12000$ МПа, повышается износостойкость калибров, шероховатость поверхности уменьшается до $Ra=0,063\div 0,8$ мкм при исходной шероховатости до выглаживания $Ra=0,5\div 0,25$ мкм.

6.13.2. Поверхностно-термическая обработка

Поверхностно-термическая обработка повышает износостойкость и усталостную прочность стальных деталей.

Метод заключается в интенсивном нагреве поверхностного слоя до температуры закалки и резком последующем охлаждении. В результате такой обработки происходит закалка только поверхностных слоев. Нагрев поверхностного слоя осуществляется токами высокой частоты ТВЧ.

Закалка ТВЧ обеспечивает более высокую поверхностную твердость по сравнению с другими методами закалки. Высокая скорость нагрева при закалке ТВЧ не вызывает появления на поверхности окисного слоя. В объеме упрочненного поверхностного слоя формируется мелкоигльчатый мартенсит.

6.13.3. Диффузионные покрытия

Диффузионное насыщение металлов и сплавов различными элементами изменяет физико-химическое состояние и напряженность поверхностного слоя деталей. Изменяются химический и фазовый состав, структура, свойства, остаточные напряжения, электродный потенциал. Процесс диффузионного насыщения металла разделяется на три стадии: образование активных атомов, адсорбция атомов, диффузия атомов. Образование активных атомов происходит в результате диссоциации газообразных соединений насыщаемого элемента.

Диффузионное насыщение поверхностного слоя металла зависит от состояния кристаллической структуры поверхности детали. Диффузия возникает тогда, когда атомы (ионы) вещества, перемещаясь в кристаллической решетке растворителя, образуют с ним твердый раствор. Механизм диффузии предусматривает наличие в кристаллической решетке металла несовершенств (вакантных узлов или дырок). Возникновение атомных дырок объясняется непрерывными тепловыми колебаниями атомов и соударениями их с другими атомами.

Различают следующие основные методы диффузионного насыщения: твердофазный, жидкофазный, газовый и парофазный методы.

Твердофазный метод диффузионного насыщения осуществляется контактным способом. Частицы порошка диффундирующего вещества находятся в контакте с поверхностью детали. Этим методом насыщают поверхности детали тугоплавкими металлами (молибден, вольфрам, ниобий, хром, танталом).

Диффузионное насыщение осуществляется следующим образом: на поверхность детали наносят покрытие (электролитическим осаждением или напылением), а затем производят отжиг.

Газовый метод насыщения основан на взаимодействии газовой фазы, содержащей диффундирующий элемент в составе химического соединения, с поверхностью насыщаемого металла. Активной газовой фазой служат обычно галогены диффундирующих элементов.

Парофазный метод насыщения основан на взаимодействии пара диффундирующего элемента с металлом при нагревании. Во избежание окисления парофазное насыщение проводят в защитной среде (азот, водород, аргон) или в вакууме.

6.13.4. Покрытие напылением

Напылять покрытия на поверхность детали можно различными методами. В зависимости от источника энергии, которая используется для распыления напыляемого материала, различают газопламенные и электрические методы напыления. При газопламенном напылении используется теплота, выделяющаяся при горении смеси горючего газа с кислородом. Одной из разновидностей газопламенного напыления является детонационное напыление, при котором используется энергия детонации смеси ацетилена с кислородом. Из электрических методов напыления используют электродуговое, плазменное и высокочастотное индукционное.

Газопламенное напыление. В зависимости от состава напыляемого материала различают два вида газопламенного напыления: проволочное и порошковое. При порошковом напылении наплавляемый материал поступает в горелку сверху из бункера через отверстие, разгоняется потоком транспортирующего газа (смесь кислород – горючий газ) и на выходе из сопла попадает в пламя (рис. 6.14).

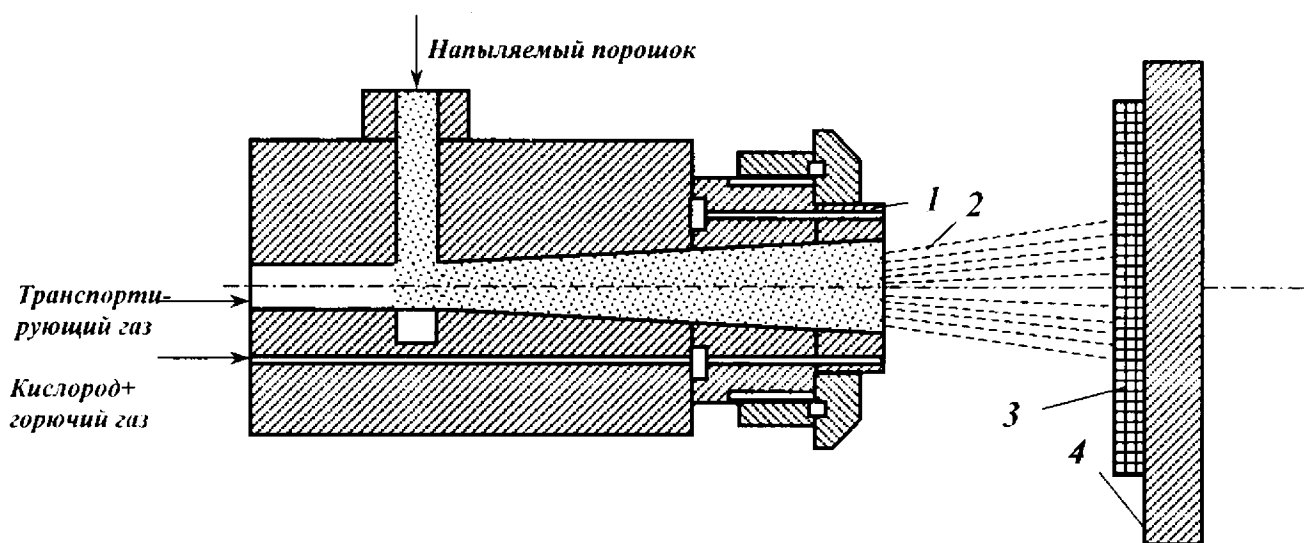


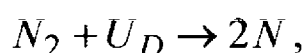
Рис. 6.14. Газопламенное напыление паром нового материала:

1—сопло; 2—факел; 3—покрытие; 4—подложка

Увлекаемые струей горючего газа распыленные частицы порошка попадают на напыляемую поверхность. В проволочных горел-

ках, как и в порошковых, подача напыляемого материала в пламя и разгон образующихся расплавленных частиц производится струей сжатого воздуха. В качестве горючего газа используют ацетилен, пропан, водород и др. Температура пламени горелки не превышает 2900°C.

Плазменное напыление. Плазменное напыление – перспективный метод покрытия. Если нагреть газ, молекулы которого состоят из нескольких атомов, до температуры 1000°K, то произойдет разрушение молекулярных связей и газ перейдет в атомарное состояние. Этот процесс называется диссоциацией. Происходящие при этом изменения, например для азота, можно представить в виде



где U_D – энергия диссоциации в электронвольтах, эВ.

При дальнейшем повышении температуры от атомов отделяются электроны и происходит их ионизация.

Газ, в котором значительная часть атомов и молекул ионизирована и концентрация электронов и отрицательных ионов равна концентрации положительных ионов, называется плазмой. Плазма обладает высокой электропроводностью. Наиболее распространенными плазмообразующими газами является аргон, азот, водород, гелий. Параметры этих газов приведены в табл. 6.6.

Т а б л и ц а 6.6. Параметры плазмообразующих газов

Газ	Мощность, подводимая к горелке, кВт	Напряжение на дуге, В	Температура плазмы, °K
Азот	60	65	7470
Водород	62	120	5270
Гелий	50	47	20270
Аргон	48	40	14270

Плазменная струя на выходе из сопла пламенной горелки имеет несколько тысяч градусов (7000 – 20000°C). Такой температуры достаточно для расплавления любого твердого вещества.

Для получения плазмы используют два типа головок (плазмотронов): плазменно-дуговые и плазменно-струйные. В плазменно-

дуговой горелке (рис. 6.15, *a*) электрическая дуга горит между анодом, которым является обрабатываемый материал, и катодом, изготовленным из вольфрама.

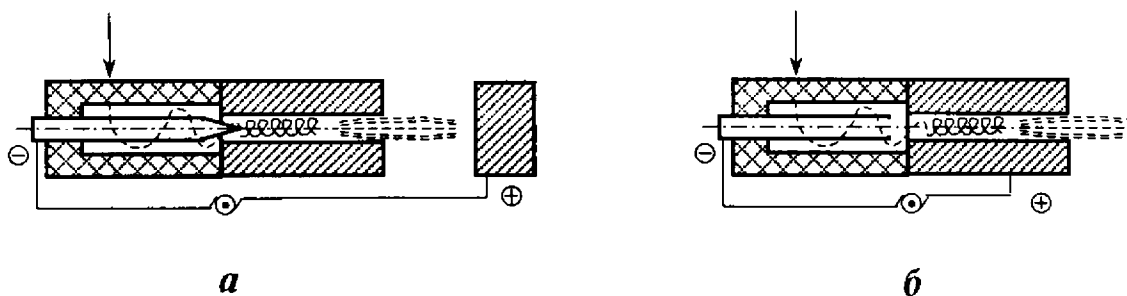


Рис. 6.15. Плазменно-дуговая (*a*), плазменно-струйная (*б*) головки

Дугу стабилизирует закрученный поток рабочего (плазмообразующего) газа.

В плазменно-струйной головке (рис. 6.15, *б*) дуга образуется между вольфрамовым катодом и анодом, которым является медное сопло, охлаждаемое водой.

Дуга нагревает до высокой температуры рабочий газ, подаваемый с закруткой в камеру горелки. Газ выходит из сопла в виде плазменной дуги с температурой $7000 - 20000^{\circ}\text{C}$.

Под воздействием такой температуры происходит расплавление напыляемого вещества. Плазменное покрытие имеет хорошее сцепление напыляемого порошка с подложкой и высокую плотность. Однако процесс плазменного напыления имеет сравнительно низкую производительность, высокую себестоимость, сопровождается шумом и сильным ультрафиолетовым излучением.

ГЛАВА 7

ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

7.1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Основной целью технологического процесса является обеспечение заданных характеристик качества изделий наиболее производительным путем при минимальных затратах. Отсюда возникает необходимость в определении двух главных критериев оптимальности: максимальной производительности и минимальной себестоимости.

При решении оптимизационных задач технолог должен, во-первых, определить систему ограничений, отражающих условия протекания технологического процесса и требования, предъявляемые к нему, а во-вторых, обеспечить экстремум критерия оптимальности. Однако следует иметь в виду, что оптимальный технологический процесс – это не идеальный, который удовлетворяет условиям оптимальности всех искомых параметров, а наилучший только по одному или по двум критериям оптимальности. Например, требуется обеспечить максимальную производительность, или минимальный расход материала, или наивысшую точность обработки и т. д. Поэтому при проектировании новой технологии необходимо четко определиться с выбором критерия оптимальности. Критерий оптимальности должен учитывать специфику предприятия, условия производства и задачи, стоящие перед ним.

Например, если завод испытывает трудности с изготовлением режущего и измерительного инструмента, то в качестве критерия оптимальности на первый план выступает минимум затрат на инструменты.

Критерий оптимальности представляется в виде функции, которую называют функцией цели или целевой функцией.

Различают два вида оптимизации технологических процессов: структурную и параметрическую.

Структурная оптимизация характеризует выбор оптимальной структуры технологического процесса. Например, выбор оптимального маршрута обработки или выбор оптимальной конфигурации заготовки, типа оборудования и т. д. Параметрическая оптимизация обеспечивает получение оптимальных технологических параметров. Например, определение режимов резания, стойкости инструмента, допусков на межоперационные размеры и т. д.

Любой технологический процесс представляет структуру, состоящую из отдельных блоков и связей между ними. Под структурой понимается не любое сочетание блоков и связей, а только та часть из них, которая обеспечивает выполнение требуемой функции. Процесс создания структуры и определения параметров объекта в общем случае является процессом управления. В свою очередь, оптимизация как метод управления технологическим процессом может быть количественной и качественной. Качественная оптимизация основана на субъективном опыте, здравом смысле, логическом анализе типовых решений и справочных данных. Понятие качественной оптимизации является условным, так как любое решение можно представить количественно (например, путем определения себестоимости сравниваемых вариантов).

При проектировании технологии в ряде случаев возникает необходимость решения целого ряда задач, которые не поддаются аналитическому расчету. Например, выбор схемы базирования, выбор оборудования, назначение последовательности удаления припуска и т. д., причем эти задачи имеют также множество вариантов решения. Оптимальное содержание операции зависит от числа переходов, методов настройки станков, числа подналадок, технологической возможности оборудования и оснастки и т. д.

При формировании структуры операции необходимо:

- упорядочить общую совокупность переходов;
- определить место термической обработки;
- минимизировать количество установок и холостых движений инструмента;
- на каждый переход назначить припуски и допуски на размеры обрабатываемых поверхностей и фактические глубины резания;
- для каждого перехода установить частоту вращения шпинделя и величину подачи, обеспечивающие требуемую точность и шероховатость поверхности.

Оптимизация технологических параметров может выполняться в детерминированной (статической) постановке, т. е. при постоянных значениях всех входящих в модель параметров и в стохастической (динамической) постановке с учетом вероятности изменения целевой функции. Например, известно, что при разработке операции шлифования в детерминированной (статической) постановке при постоянных значениях всех входящих в математическую модель параметров надежность целевой функции достигает уровня доверительной вероятности не более 0,5 – 0,6. При этом наблюдается значительная вероятность отказов, т. е. невыполнения ограничений по стойкости, режущей способности инструментов, точности, шероховатости обработанных поверхностей и т. д. Для повышения надежности протекания операции шлифования требуется диагностика и применение дополнительной (внутренней) оптимизации на этапе осуществления операции, т. е. при обработке.

Величина тепловой деформации ходового винта при шлифовании резьбы определяется по детерминированной модели. Она должна быть сопоставлена с величиной, замеренной датчиком в конце прохода. Обнаруженное при этом различие должно быть использовано для коррекции математической модели, т. е. на основании полученной разности расчетных и экспериментальных значений деформации ходового винта должна быть внесена коррекция в расчетную формулу для определения тепловой деформации на последующих проходах.

На этапе проектирования оптимизация осуществляется на основе расчетно-аналитических зависимостей. На этапе обработки фактические показатели в ряде случаев отличаются от расчетных. Такое несоответствие связано с тем, что на этапе проектирования невозможно учесть индивидуальные особенности обрабатываемых деталей.

Для устранения указанного недостатка необходимо распространить (продолжить) оптимизацию на этапе обработки в форме дополнительных информационно-регулирующих воздействий на процесс. Термин «информационно-регулирующее воздействие» означает, что данное воздействие обусловлено информацией о текущем (фактическом) и требуемом (заданном) состояниях процесса. Следовательно, для оптимизации процесса следует применять системный подход CAD (CAM) (Computer Aided Development, Machining and Training).

Сущность данного подхода и оптимизации технологических процессов заключается в том, что при известном маршруте обработки, этапы разработки операции (CAD) и реализации операции (CAM)

рассматриваются как последовательные этапы предварительного (CAD) и окончательного (CAM) управления процессом, причем на этапе разработки решаются задачи определения параметров и условий обработки, обеспечивающих наибольшую производительность и требуемое качество, а на этапе реализации решаются задачи стабилизации этих параметров с учетом индивидуальных особенностей каждой детали, которые обеспечиваются на дополнительном этапе управления САТ (Computer Aided Training), где САТ – автоматизированное обучение (Training) технологической системы обработки [30].

Данная методология создания интегрированных технологических систем требует разработки математических моделей, которые должны и использоваться при проектировании, диагностике и регулировании процессов механообработки.

Методология проектирования современных интегрированных производственных систем должна быть основана на общей теории управления, в соответствии с которой управление на основе поставленной цели является необходимым многоэтапным процессом приближения к цели. Для организации управления (менеджмента) требуется разработать (или использовать имеющуюся) информационную (математическую) модель, учитывающую конструкторские, технологические, организационные и экономические свойства объекта. Наконец, требуется разработать и оптимизировать алгоритм функционирования объекта управления, позволяющий обеспечить достижение поставленной цели с минимальными производственными издержками для конкретных производственных условий.

Сформулированная таким образом задача управления должна решаться в итерационном режиме с проверкой возможности достижения поставленной цели и с оценкой соответствующих производственных затрат. В случае изменения параметров или номенклатуры выпускаемых изделий изменяются исходные данные на входе оптимизационной модели. В итерационном режиме осуществляется проверка изменений параметров во всех подсистемах информационной модели производства. Информационная модель отражает структуру предприятия. Она содержит все необходимые подсистемы, например, технологическое проектирование, размерный анализ, расчет режимов резания, нормирование технологических процессов, расчет производственного персонала, издержек производства, себестоимости продукции и т. д.

Проверка изменений параметров в подсистемах информационной модели позволяет принимать оперативные решения о выпуске конкурентно-способной продукции на самом раннем этапе ее жизненного цикла – этапе маркетинговых исследований.

7.2. СОСТАВЛЕНИЕ МОДЕЛИ ОБЪЕКТА И АЛГОРИТМА ОПТИМИЗАЦИИ

Слово «модель» прочно вошло в наш лексикон. Модели разделяют на физические и абстрактные.

Физические модели образуются из совокупности материальных объектов. К физическим моделям можно отнести, например, макет машины, прибора. Однако физические модели имеют ограниченную сферу применения, так как для многих явлений и процессов их невозможно построить.

Абстрактные модели представляются в виде словесного описания, чертежа, схемы, таблицы, алгоритма или математической зависимости. Любая модель описывает моделируемый объект с определенными допущениями. Модель не может быть абсолютно адекватной объекту. Все результаты, полученные на модели, целиком и полностью относятся только к самой модели.

Модель – это не точная копия объекта, а отображение только определенной части ее свойств, поэтому в зависимости от цели моделирования один и тот же объект может иметь разные модели. Если в математическую модель включить излишне много свойств, характеризующих объект, то получим очень сложную систему уравнений с большим количеством неизвестных параметров и неизвестных функций. Наоборот, если принять слишком простую математическую модель, то в итоге решения обнаружим, что она не раскрывает в полной мере явления, удовлетворяющие поставленным условиям. Следовательно, при получении оптимальных решений надо отделить главные свойства объекта от второстепенных, использовать их при моделировании, а второстепенными свойствами пренебречь. Однако отделение главных свойств объекта от второстепенных и разработка математической модели – это искусство и творчество, требующее высоких знаний объекта и личных способностей технолога.

Структура математической модели содержит целевую функцию (ЦФ), граничные условия (ГрУ) и ограничения (ОГР).

В качестве примера рассмотрим математическую модель для определения оптимальных режимов при токарной обработке с учетом ограничений и граничных условий.

Величина машинного времени t_p определяется из формулы

$$t_p = \frac{L}{nS}. \quad (7.1)$$

Принимая машинное время в качестве целевой функции, получим

$$\min t_p = \frac{L}{nS} \rightarrow \max (F > nS). \quad (\text{ЦФ})$$

Ограничения по режущей способности, мощности привода главного движения и производительности

$$\left\{ \begin{array}{l} nS^y \leq \frac{1000 \cdot C_v}{\pi T_H^m t^{x_v}} \quad (\text{режущая способность}) \\ n^{z_p+1} S^{y_p} \leq \frac{6120 \cdot 10^{3(z_p+1)} N_{\text{дв}} \eta}{C_p (\pi D)^{z_p+1} k_p t^{x_p}} \quad (\text{мощность привода}) \\ nS \geq \frac{nl_p}{60 \cdot k_3 n_d - t_B \Pi} \quad (\text{производительность}). \end{array} \right. \quad (\text{ОГР})$$

Предельные значения частоты вращения шпинделя и продольной подачи

$$\left\{ \begin{array}{l} n_{\min} \leq n \leq n_{\max} \\ S_{\min} \leq S \leq S_{\max} \end{array} \right., \quad (\text{ГРУ})$$

где n , S – частота вращения шпинделя и продольная подача соответственно (оптимизируемые параметры); T_H – нормативная стойкость инструмента; D – диаметр обрабатываемой детали; t – глубина резания; C_v и C_p – постоянные коэффициенты; l_p – вылет резца; k_3 – коэффициент загрузки оборудования; n_d – число одновременно обрабатываемых деталей; Π – заданная производительность; t_p – ма-

шинное время; L – путь, пройденный резцом; t_b – вспомогательное время; $N_{дв}$ – мощность привода главного движения станка; η – КПД привода.

Система ограничений (ОГР) и функция цели (ЦФ) в математической модели [28] не линейны. Если правые части в неравенствах ограничений обозначить буквой P с соответствующим индексом и представить систему ограничений и функцию цели в логарифмических координатах, то решение задачи оптимизации математической модели [28] существенно упростится.

Условия оптимизации в новой постановке имеют вид

$$\begin{aligned}
 F_1 = l_n F = \alpha + \beta &\rightarrow \max \\
 \alpha = l_n S; \quad \beta = l_n n; \\
 \beta + y\alpha &\leq l_n P_{pc}; \\
 (z_p + 1)\beta + y_p \alpha &< l_n P_{M.C}; \\
 \beta + \alpha &\geq l_n P_{пр}; \\
 \alpha_{\min} &\leq \alpha \leq \alpha_{\max}; \\
 \beta_{\min} &\leq \beta \leq \beta_{\max}.
 \end{aligned} \tag{7.2}$$

Область допустимых значений оптимизируемых параметров представлена на рис.7.1 [31].

Максимум целевой функции находится в вершине заштрихованного многоугольника, наиболее удаленной от начала координат $n^x s^x$.

При проектировании технологических процессов аналогичным образом с использованием линейного программирования решаются другие оптимизационные задачи, например, определение оптимальной геометрии режущих инструментов, распределение припуска по проходам, оптимальная загрузка оборудования и т. д.

Если модель описывает зависимость между исходными данными и искомыми величинами, то алгоритм оптимизации представляет собой последовательность действий, которые надо выполнить, чтобы

перейти от исходных данных к искомым величинам. Алгоритм может быть записан в словесной форме, т. е. в виде описания необходимых действий или в виде формул, определяющих последовательность выполнения решений.

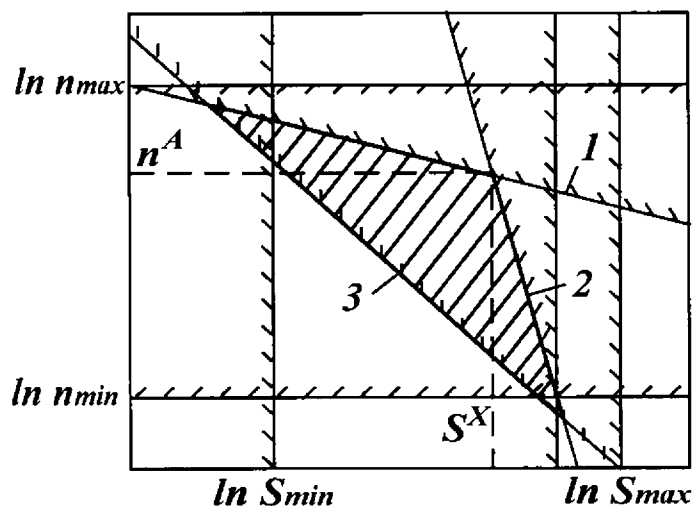


Рис. 7.1. Область допустимых значений оптимизируемых параметров

Наиболее удобной формой записи алгоритма является блок-схема. Она не только наглядно описывает алгоритм, но и является основой для составления программы на ЭВМ. Алгоритмы и программы объединяются «математическим обеспечением», которое является основой для решения технологических задач. В современных ЭВМ применяются пакеты прикладных программ (ППП).

Пакет прикладных программ – это объединение модели, алгоритма и программы, позволяющее решить конкретную технологическую задачу.

7.3. ПОИСК ОПТИМАЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

Значительная часть технологических оптимизационных задач решается с использованием линейного программирования. При этом в математических моделях параметры обычно имеют строго определенные значения. Однако на практике постоянство параметров на определенном временном интервале наблюдается очень редко. Например, сказать точно, сколько ресурсов в течение планируемого периода потребуется, или определить процент бракованных деталей невозможно, так как эти показатели зависят от множества различных факторов, которые определить заранее очень трудно.

В реальных условиях входящие в математическую модель величины зависят от ряда случайных факторов и не могут быть определены однозначно. Поэтому, с одной стороны, объективно существует неопределенность, а с другой – технолог должен принимать кон-

кретные решения. Прежде всего – надо найти меру для оценки случайности. Эта проблема является предметом специальной науки – теории вероятности. Чтобы использовать теорию вероятности для принятия оптимальных решений в условиях неопределенности, необходимо научиться оценивать случайность числом, т. е. измерять случайность.

Численную меру возможности появления случайного события называют вероятностью. Вероятность события A определяется частотой

$$P(A) = \frac{m}{n},$$

где m – число вероятных событий; n – общее число событий.

Закон распределения устанавливает связь между возможными значениями случайных величин и вероятностями их появления. Для определения, например, настройки станка, обеспечивающего минимальное количество исправимого брака, наиболее предпочтительным является закон нормального распределения размеров. Уравнение кривой нормального распределения размеров имеет вид

$$Y = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x_i - \bar{x})^2}{2\sigma^2}}. \quad (7.3)$$

Кривые, характеризующие закон нормального распределения, представлены на рис. 7.2.

Среднее арифметическое значение \bar{x} характеризует положение центра группирования размеров. Кривая асимптотически приближается к оси абсцисс. Площадь, ограниченная кривой Гаусса и осью X (рис. 7.2, а), равна единице и определяет 100% всех обработанных деталей в партии.

В тех случаях, когда поле рассеяния размеров на данной операции больше допуска $6\sigma > T$, условие работы без брака невозможно.

Площади заштрихованных участков характеризуют количество деталей, размеры которых выходят за пределы поля допуска на изготовление (рис. 7.2, б, в). Для определения количества годных деталей необходимо найти площадь, ограниченную кривой Гаусса и осью абсцисс X в пределах допуска на изготовление.

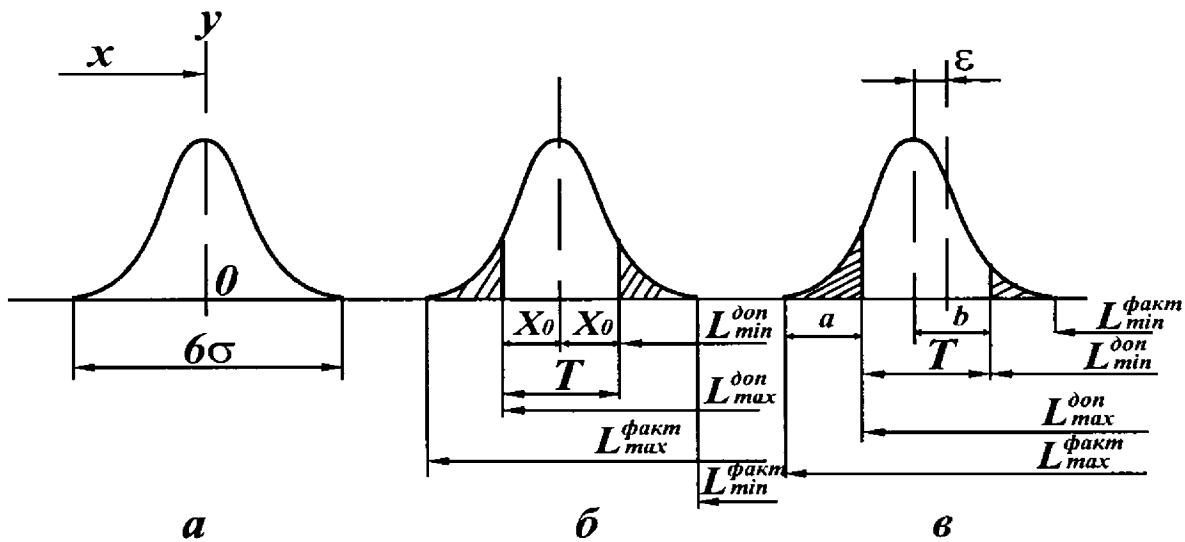


Рис. 7.2. Кривые рассеяния размеров

При симметричном расположении поля рассеяния размера относительно поля допуска, т. е. когда координата центра группирования размеров \bar{x} совпадает с серединой поля допуска на изготовление, следует найти удвоенное значение функции Лапласа, описывающей площадь, ограниченную кривой Гаусса и абсциссой x_0

$$\Phi(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^t e^{-\frac{t^2}{2}} dt. \quad (7.4)$$

Значения этой функции табулированы в зависимости от величины нормированного параметра распределения (или коэффициента риска), который определяется выражением

$$t = \frac{L - L_{\text{ср}}}{\sigma} = \frac{x_0}{\sigma}. \quad (7.5)$$

С увеличением параметра t возрастает количество годных деталей и уменьшается процент ожидаемого брака.

На конкретном примере ($\sigma = 0,025$ мм, $T = 0,1$ мм, $\varepsilon = 0$) определим процент исправимого и неисправимого брака (рис. 7.2, б).

1. Определяем параметр $t = \frac{x_0}{\sigma}$, $t = \frac{T}{2\sigma} = 2$.

Из табл. (приложение 1) найдем функцию Лапласа $\Phi(t) = 0,4772$.

2. Процент исправимого брака равен $P = 50 - 47,72 = 2,28\%$.

При смещении центра группирования размеров относительно середины поля допуска на величину $\xi = 0,02$ мм, процент исправимого брака возрастает (рис.7.2,в).

$$\text{Параметр } t = \frac{T/2 - \xi}{\sigma} = \frac{0,05 - 0,02}{0,025} = 1,2 .$$

Из таблицы 1 (приложение) функция Лапласа равна $\Phi(t) = 0,3849$.

Процент исправимого брака $P = 50 - 38,49 = 11,51\%$.

Из анализа приведенных данных видно, что на станках, настроенных на размер, наладка станка оказывает существенное влияние на количество бракованных деталей. При совпадении центра группирования размеров с серединой поля допуска количество бракованных деталей, требующих доработки, равно 2,28%.

При смещении центра группирования размеров от середины поля допуска на величину $\xi = 0,02$ мм количество бракованных деталей, требующих доработки, возрастает до 11,77%.

Себестоимость затрат на дополнительную доработку бракованных деталей с учетом стоимости окончательно бракованных деталей зависит от направления и величины смещения центра группирования размеров от середины поля допуска $\pm \xi$ (рис.7.2, в).

Технологическую себестоимость затрат от количества бракованных деталей можно представить в виде

$$C = \varphi_1 p_1 + \varphi_2 p_2, \quad (7.6)$$

где φ_1 – стоимость одного процента деталей, подвергнутых дополнительной доработке (исправимый брак); p_1 – процент исправимого брака; φ_2 – стоимость одного процента деталей неисправимого брака; p_2 – процент неисправимого брака.

Принимая 1% окончательно бракованных деталей $\varphi_2 = 100$ ед, а стоимость 1% деталей, требующих дополнительной доработки, $\varphi_1 = 10$ ед., определим технологическую себестоимость затрат для следующих условий обработки: $\sigma = 0,025$ мм, $T=0,1$ мм, $\xi_1 = 0$, $\xi_2 = 0,005$ мм, $\xi_3=0,01$ мм, $\xi_4=0,015$ мм, $\xi_5=0,018$ мм, $\xi_6=0,02$ мм, $\xi_7=0,025$ мм.

Результаты расчета приведены в таблице 7.1.

Т а б л и ц а 7.1

Величина смещения ε , мм	0,0	0,005	0,01	0,015	0,018	0,02	0,025
Процент исправимого брака p_1 , %	2,28	3,59	5,48	8,85	10,9	11,51	15,87
Процент неисправимого брака p_2 , %	2,28	1,49	0,82	0,47	0,37	0,26	0,135
Технологическая себестоимость условных единиц	250,8	144,9	136,8	135,5	137,0	141,1	171,87

Из приведенных в табл. 7.1 данных видно, что наилучшим вариантом обработки (имеющим наименьшую технологическую себестоимость) является вариант настройки станка с величиной смещения центра группирования размеров от середины поля допуска на величину $\varepsilon=0,015$ мм. Полученный наилучший вариант $\varepsilon = 0,015$ мм является рациональным, но не оптимальным. Оптимальный вариант может быть найден в результате оптимизации функции (7.6).

Для составления математической модели необходимо сформулировать содержательную постановку задачи.

Например, требуется найти такую величину смещения центра группирования размеров от середины поля допуска, при которой технологическая себестоимость операции будет минимальна:

$$F = p_1\varphi_1 + p_2\varphi_2 \rightarrow \min$$

$$p_i = \Phi(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^t e^{-\frac{t_i^2}{2}} dt_i, \quad i=(1,2)$$

$$t_1 = \frac{0,5T + \varepsilon}{\sigma}, \quad t_2 = \frac{0,5T - \varepsilon}{\sigma}, \quad 0 \leq \varepsilon \leq \frac{T}{2}$$

$$F = \Phi\left(\frac{0,5T + \varepsilon}{\sigma}\right)\varphi_2 + \Phi\left(\frac{0,5T - \varepsilon}{\sigma}\right)\varphi_1. \quad (7.7)$$

Производная целевой функции

$$F = \varphi_2 \frac{d\Phi\left[\frac{0,5 + \varepsilon}{\sigma}\right]}{d\varepsilon} + \varphi_1 \frac{d\Phi\left[\frac{0,5 - \varepsilon}{\sigma}\right]}{d\varepsilon} = 0,$$

так как

$$\frac{d\Phi(t)}{d\varepsilon} = \frac{d\Phi(t)}{dt} \cdot \frac{dt}{d\varepsilon},$$

то получим

$$\frac{dF}{d\varepsilon} = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \left[\varphi_2 \exp\left\{-\frac{(0,5T + \varepsilon)^2}{2\sigma^2}\right\} - \varphi_1 \exp\left\{-\frac{(0,5T - \varepsilon)^2}{2\sigma^2}\right\} \right] = 0$$

$$\text{или } \ln \frac{\varphi_2}{\varphi_1} = \frac{(0,5T + \varepsilon)^2 - (0,5T - \varepsilon)^2}{2\sigma^2},$$

$$\text{т. е. } \ln \frac{\varphi_2}{\varphi_1} = \frac{2T\varepsilon}{2\sigma^2}.$$

$$\text{Наконец, } \varepsilon_{opt} = \frac{\sigma^2}{T} \cdot \ln \frac{\varphi_2}{\varphi_1}.$$

Пример: $\varphi_0 = 100$ ед, $\sigma = 0,025$ мм,

$\varphi_1 = 10$ ед, $T = 0,1$ мм.

$$\varepsilon_{opt} = \frac{(25 \cdot 10^{-3})^2}{0,1} \cdot \ln \frac{100}{10} = 0,00625 \cdot \ln 10 = 0,00625 \cdot 2,3 = 0,014375 \text{ мм.}$$

Ранее полученное рациональное решение равно $\varepsilon_{opt} = 0,015$ мм.

7.4. ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГЕОМЕТРИЧЕСКОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ

Метод геометрического программирования основан на теореме двойственности.

Целевая функция $F(t_1, t_2, t_3, \dots, t_n)$ представляется в виде суммы полиномов

$$F(t_1, t_2, \dots, t_n) = u_1(t_1, t_2, \dots, t_n) + u_2(t_1, t_2, \dots, t_n) + \dots + u_k(t_1, t_2, \dots, t_n)$$

и заменяется двойственной функцией $V(t_1, t_2, \dots, t_n)$. Двойственная функция представляется в виде произведения этих же полиномов, разделенных и возведенных в степень на коэффициенты δ_i

$$V(t_1, t_2, \dots, t_n) = \left(\frac{u_1(t_1, t_2, \dots, t_n)}{\delta_1} \right)^{\delta_1} \cdot \left(\frac{u_2(t_1, t_2, \dots, t_n)}{\delta_2} \right)^{\delta_2} \times \dots \times \left(\frac{u_k(t_1, t_2, \dots, t_n)}{\delta_k} \right)^{\delta_k}, \quad (7.8)$$

где δ_i – весовые коэффициенты, удовлетворяющие условию нормализации

$$\delta_1 + \delta_2 + \delta_3 + \dots + \delta_k = 1. \quad (7.9)$$

В условии (7.8) число весовых коэффициентов соответствует количеству полиномов (слагаемых) целевой функции. Причем минимум целевой функции F в некоторой точке $(t'_1, t'_2, t'_3, \dots, t'_n)$ соответствует максимуму двойственной функции V в этой точке. Это условие обеспечивается при нулевых значениях показателей степени переменных t_i , т. е.

$$\begin{cases} a_{11}\delta_1 + a_{21}\delta_2 + a_{31}\delta_3 + \dots + a_{m1}\delta_m = 0 \\ a_{12}\delta_1 + a_{22}\delta_2 + a_{32}\delta_3 + \dots + a_{m2}\delta_m = 0 \\ \vdots \\ a_{1n}\delta_1 + a_{2n}\delta_2 + a_{3n}\delta_3 + \dots + a_{mn}\delta_m = 0 \end{cases} \quad (7.10)$$

Система уравнений (7.10) характеризует условие ортогональности задачи. Весовые коэффициенты δ_j определяются из системы уравнений (7.10) и уравнения (7.9). После определения весовых коэффициентов максимальное значение двойственной функции определяется из выражения

$$\begin{aligned}
 V &= \left(\frac{u_1}{\delta_1}\right)^{\delta_1} \times \left(\frac{u_2}{\delta_2}\right)^{\delta_2} \times \dots \times \left(\frac{u_m}{\delta_m}\right)^{\delta_m} = \\
 &= \left(\frac{c_1}{\delta_1}\right)^{\delta_1} \times \left(\frac{c_2}{\delta_2}\right)^{\delta_2} \times \dots \times \left(\frac{c_m}{\delta_m}\right)^{\delta_m} \times t_1^{a_{11}\delta_1+a_{21}\delta_2+\dots+a_{m1}\delta_m} \times \\
 &\times t_2^{a_{12}\delta_1+a_{22}\delta_2+\dots+a_{m2}\delta_m} \times \dots \times t_n^{a_{1n}\delta_1+a_{2n}\delta_2+\dots+a_{mn}\delta_m} = \\
 &= \left(\frac{c_1}{\delta_1}\right)^{\delta_1} \times \left(\frac{c_2}{\delta_2}\right)^{\delta_2} \times \dots \times \left(\frac{c_m}{\delta_m}\right)^{\delta_m}. \tag{7.11}
 \end{aligned}$$

Существенное достоинство метода геометрического программирования заключается в нахождении экстремума целевой функции F без предварительного определения значений независимых переменных t_i . Переменные t_i определяются после нахождения экстремума функции V , исходя из системы уравнений

$$\begin{cases} u_1 = V_{\max} \cdot \delta_1 \\ u_2 = V_{\max} \cdot \delta_2 \\ \vdots \\ u_j = V_{\max} \cdot \delta_j \end{cases}, \tag{7.12}$$

где $j = 1, 2, 3, \dots, m$; δ_j – весовые коэффициенты соответствующих позиномов.

Степень трудоемкости решаемых задач оценивается методом геометрического программирования по формуле

$$\alpha = m - n - 1, \tag{7.13}$$

где m – количество позиномов задачи; n – число переменных.

На конкретном примере рассмотрим задачу нулевой степени сложности.

Задача. Требуется изготовить бак, имеющий форму кругового цилиндра (рис. 7.3). Объем бака задан V . Требуется обеспечить минимальный расход материала.

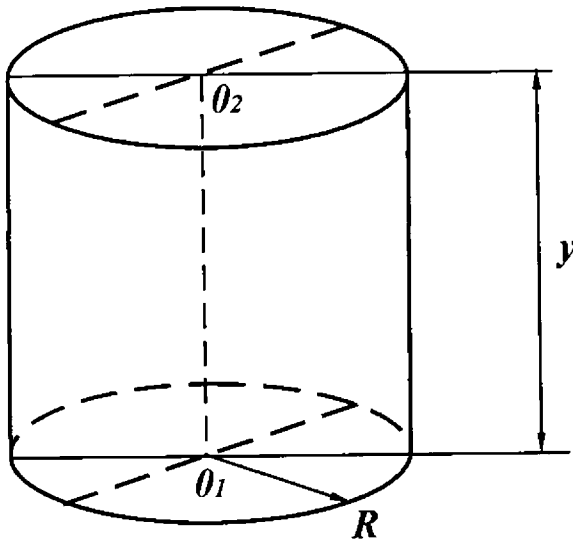


Рис. 7.3. Расчетная схема

Решение:

Задача имеет две переменных R и y . Целевая функция состоит из суммы двух позиномов $u_1 = 2\pi R^2$; $u_2 = 2\pi R y$.

Ограничением является объем бака $\pi R^2 y \geq V \rightarrow 1 \geq \frac{V}{\pi R^2 y}$ или

$$q_1(R, y) = \frac{V}{\pi} R^{-2} y^{-1}.$$

Каждому позиному задачи присваивается весовой коэффициент

$$u_1 = 2\pi R^2 \cdot \delta_1; \quad u_2 = 2\pi R y \cdot \delta_2; \quad u_3 = \frac{V}{\pi} R^{-2} y^{-1} \cdot \delta_3.$$

Двойственная функция задачи запишется в виде

$$V(R, y) = \left(\frac{2\pi}{\delta_1}\right)^{\delta_1} \times \left(\frac{2\pi}{\delta_2}\right)^{\delta_2} \times \left(\frac{2\pi}{\delta_3}\right)^{\delta_3} \times R^{2\delta_1 + \delta_2 - 2\delta_3} \times y^{\delta_2 - \delta_3} \times (\delta_3)^{\delta_3}.$$

Условия нормализации $\delta_1 + \delta_2 = 1$.

$$\text{Условия ортогональности} \begin{cases} 2\delta_1 + \delta_2 - 2\delta_3 = 0 \\ \delta_2 - \delta_3 = 0 \end{cases}$$

$$\text{Решая совместно систему} \begin{cases} 2\delta_1 + \delta_2 - 2\delta_3 = 0 \\ \delta_2 - \delta_3 = 0 \\ \delta_1 + \delta_2 = 1, \end{cases}$$

получим $\delta_1 = \frac{1}{3}$, $\delta_2 = \frac{2}{3}$, $\delta_3 = \frac{2}{3}$.

Количество позиномов задачи $m = 3$, количество переменных $n = 2$. Степень трудности решения задачи $\alpha = 3 - 2 - 1 = 0$.

Минимальное значение целевой функции F равно максимальному значению двойственной функции

$$V_{\max} = \left(\frac{2\pi}{1} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot \left(\frac{2\pi}{2} \right)^{\frac{2}{3}} \cdot \left(\frac{V \cdot 3}{\pi \cdot 2} \right)^{\frac{2}{3}} \cdot \left(\frac{2}{3} \right)^2 = 6\pi \left(\frac{V}{2\pi} \right)^{\frac{2}{3}} = F_{\min}.$$

Значение переменных R , y находим из системы уравнений

$$\begin{cases} u_1 = V \cdot \delta_1 \\ u_2 = V \cdot \delta_2, \\ u_3 = 1 \end{cases} \begin{cases} 2\pi R^2 = 6\pi \left(\frac{V}{2\pi} \right)^{\frac{2}{3}} \cdot \frac{1}{3} \\ 2\pi R y = 6\pi \left(\frac{V}{2\pi} \right)^{\frac{2}{3}} \cdot \frac{2}{3} \\ \frac{V}{\pi} R^{-2} y^{-1} = 1 \end{cases}.$$

Из первого уравнения находим $R = \sqrt[3]{\frac{V}{2\pi}}$.

После подстановки полученного значения во второе уравнение получим $y = 2 \sqrt[3]{\frac{V}{2\pi}}$.

Последнее уравнение дает тождество $1=1$.

7.5. ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФУНКЦИИ ЛАГРАНЖА

Экстремум функции n переменных $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$, подчиненных дополнительным ограничениям, можно найти методом нахождения

ния множителя Лагранжа. Например, если $z = f(x, y)$ функция двух переменных, подчиненных одному условию связи $\varphi(x, y) = 0$, то функция Лагранжа будет иметь следующий вид

$$\Phi = f(x, y) + \lambda\varphi(x, y). \quad (7.14)$$

Для нахождения экстремума функции необходимо найти частные производные от функции Лагранжа и приравнять их нулю

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Phi}{\partial x} = 0 & \text{ или } \frac{\partial f}{\partial x} + \lambda \frac{\partial \varphi}{\partial x} \\ \frac{\partial \Phi}{\partial y} = 0 & \text{ или } \frac{\partial f}{\partial y} + \lambda \frac{\partial \varphi}{\partial y}. \end{aligned} \quad (7.15)$$

$$\varphi(x, y) = 0$$

Пример: площадь кругового цилиндра (рис. 7.3) является целевой функцией $F(R, y) = 2\pi R^2 + 2\pi R y$.

Заданный объем цилиндра является ограничением $\pi R^2 y \geq V$.

Функцию ограничения представим в виде $\varphi(x, y) = 0$

$$\varphi(x, y) = V - \pi R^2 y = 0.$$

Тогда функция Лагранжа будет иметь вид

$$\Phi(x, y) = 2\pi R^2 + 2\pi R y - \lambda(V - \pi R^2 y),$$

где λ – множитель Лагранжа.

Решение задачи может быть найдено из системы уравнений

$$\begin{cases} \frac{\partial \Phi}{\partial R} = 0 \\ \frac{\partial \Phi}{\partial y} = 0 \\ \varphi(R, y) = 0 \end{cases}, \quad \begin{cases} \frac{\partial \Phi}{\partial R} = 4\pi R + 2\pi y - 2\lambda\pi R y = 0 \\ \frac{\partial \Phi}{\partial y} = 2\pi R - \lambda\pi R^2 = 0 \\ V = \pi R^2 y \end{cases}. \quad (7.16)$$

Определив из второго уравнения системы параметр $\lambda = 2/R$ и подставив его в систему уравнений (7.16), получим

$$\begin{cases} 2R - y = 0 \\ V = \pi R^2 y \end{cases}$$

Из решения данной системы уравнений, получим

$$R = \sqrt[3]{\frac{V}{2\pi}}, \quad y = 2 \sqrt[3]{\frac{V}{2\pi}}.$$

Минимальное значение целевой функции

$$F(R, y)_{\min} = 6\pi \left(\frac{V}{2\pi} \right)^{2/3}.$$

7.6. НАХОЖДЕНИЕ ЭКСТРЕМУМА ФУНКЦИИ

Для нахождения экстремума функции $f(x)$ необходимо вычислить производную этой функции $f'(x)$ и приравнять ее к нулю.

Для определения вида экстремума следует определить изменение знака производной при переходе экстремальной точки. Изменение знака производной с плюса на минус означает, что функция в экстремальной точке имеет максимум и, наоборот, изменение знака функции с минуса на плюс означает, что функция имеет минимум. Если знак производной функции $f'(x)$ не изменяется, то данная функция $f(x)$ в исследуемой точке экстремума не имеет. Кривая в этой точке имеет перегиб.

Вторая производная функции, имеющей экстремуму, также может быть использована для определения максимума или минимума функции.

Если в точке экстремума вторая производная $\frac{d^2 f}{dx^2} < 0$, то функция $f(x)$ имеет в точке x максимум.

Если в точке экстремума вторая производная функции $f(x)$ положительна, т. е. $\frac{d^2 f}{dx^2} > 0$, то функция $f(x)$ имеет в точке x минимум.

Зависимость производительности обработки вала от скорости резания описывается выражением

$$Q = -0,06V^2 + 5,63V - 87,6, \quad (7.17)$$

где V – скорость резания м/мин; Q – количество обрабатываемых деталей в единицу времени.

В табл. 7.2 представлены расчетные значения производительности при различных скоростях резания

Т а б л и ц а 7.2

Скорость резания V , м/мин	20	30	40	50	60	70
Q	1	27	41,6	43,9	34,2	12,4

Из анализа данных, приведенных в таблице, видно, что наиболее предпочтительной скоростью резания, которая обеспечивает наибольшую производительность, является скорость $V = 50$ м/мин. Однако следует заметить, что скорость резания $V = 50$ м/мин – рациональна, но не оптимальна.

Для определения оптимальной скорости резания, при которой производительность Q имеет максимальное значение, необходимо первую производную функцию (7.17) приравнять к нулю

$$Q' = -0,12V + 5,63 = 0. \quad (7.18)$$

Из решения уравнения (7.17) определяется оптимальная скорость резания $V = \frac{5,63}{0,12} = 46,9$ м/мин.

Для определения оптимальной производительности Q следует оптимальное значение скорости подставить в уравнение (7.17) и вычислить Q . Получим $Q = 44,4$ ед.

7.7. ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ЛИНЕЙНОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ЗАДАЧ

Линейное программирование – сравнительно новая область применения математики в решении многих технологических задач, связанных, в первую очередь, с потребностями рационального планирования производства. Во многих случаях линейное программирование дает возможность установить, каким образом следует распорядиться имеющимися ресурсами для достижения наибольшей производительности и получения требуемого качества изготовления деталей.

Например, каким образом следует использовать имеющиеся на предприятии запасы сырья для изготовления тех или иных видов продукции, чтобы доход предприятия был наибольшим.

Можно решать задачи, связанные с оптимальной загрузкой металлорежущих станков. Например, как лучше использовать оборудование цеха, чтобы выполнить установленный план по всем видам выпускаемой продукции. Кроме того, можно решать транспортные задачи, например, как лучше организовать транспортировку деталей между цехами, чтобы общая стоимость транспортных расходов была наименьшей.

7.7.1. Оптимизация технологической себестоимости изготовления масляного бака

Технологическая себестоимость масляного бака должна учитывать стоимость листового материала и стоимость сварочных работ. Ее можно представить в виде затрат

$$C = \alpha S + \beta l, \quad (7.19)$$

где S – площадь материала 1Х18Н9Т, необходимого для изготовления масляного бака объемом $V = 2000$ л.; l – длина сварочного шва; α – стоимость единицы площади материала, из которого изготовлен масляный бак; β – стоимость единицы длины сварочного шва.

Постановку оптимизационной задачи можно рассматривать в двух вариантах.

Первая постановка оптимизационной задачи предусматривает определение размеров масляного бака заданного объема с минимальной стоимостью

$$F_1 = C \rightarrow \min$$

$$V = V_{\text{зад}}.$$

Вторая постановка оптимизационной задачи предусматривает определение размеров масляного бака, вмещающего максимальный объем при заданных α и β ,

$$F_2 = V \rightarrow \max$$

$$C = C_{\text{зад}}.$$

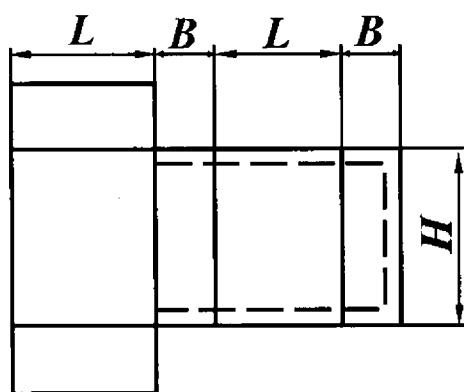


Рис. 7.4. Развертка листового материала для изготовления бака

При фиксированном объеме бака, задаваясь различными значениями параметров L , B и H , получим различные варианты конструкции бака. Для наиболее экономичного варианта изготовления бака надо определиться с критерием, по которому следует оценивать наилучший вариант.

Выбор наивыгоднейшего варианта можно осуществить, например, по стоимости используемого материала и стоимости сварочных работ. На рис.7.4

представлена развертка листового материала и пунктирной линией – траектория сварочного шва

$$\begin{aligned} l &= 2(L + 2B) + H \\ S &= 2[LB + (L + B)H]. \end{aligned} \quad (7.20)$$

Постановку задачи для определения оптимальных размеров масляного бака объемом $V = 2000$ л можно записать так:

$$\begin{aligned} F &= S \rightarrow \min \\ V &= 2000 \end{aligned} \quad (7.21)$$

После подстановки в выражение (7.21) значения S получим

$$F = 2[LB + (L + B)H] \rightarrow \min, \quad (\text{ЦФ})$$

$$LBH = 2000, \quad (\text{ОГР}) \quad (7.22)$$

$$0 < L, B, H < \infty. \quad (\text{Гру})$$

Целевая функция (ЦФ) показывает, в каких условиях площадь листового материала, затрачиваемая на изготовление масляного бака, будет минимальна.

Граничные условия (Гру) показывают изменения переменных параметров.

Ограничение (ОГР) показывает зависимость объема масляного бака от размеров его сторон.

Для нахождения минимума функции $S = 2[LB + (L + B)H]$ при $L = \frac{2000}{BH}$ воспользуемся необходимым признаком экстремума.

Если в точке функция $P(H_0, B_0)$ имеет экстремум, то

$$\left. \frac{\partial S}{\partial H} \right|_{H_0 B_0} = 0; \quad \left. \frac{\partial S}{\partial B} \right|_{H_0 B_0} = 0,$$

$$\text{т. е.} \quad \begin{cases} \frac{\partial S}{\partial H} = 2 \left(-\frac{2000}{H^2} + B \right) = 0 \\ \frac{\partial S}{\partial B} = 2 \left(-\frac{2000}{B^2} + H \right) = 0 \end{cases}$$

Система уравнений имеет вид

$$\begin{cases} 2000 - BH^2 = 0 \\ 2000 - HB^2 = 0 \end{cases}$$

Разделив первое уравнение на второе, получим $H = B$.

Следовательно,

$$H_0 = B_0 = \sqrt[3]{2000} = 12,596 \text{ дм} ,$$

$$L_0 = \frac{2000}{\sqrt[3]{2000^2}} = \sqrt[3]{2000} = 12,6 \text{ дм} .$$

Таким образом, масляный бак имеет форму куба с ребрами $\sqrt[3]{2000} = 12,6$ дм.

Математическая модель для определения минимальной длины сварочного шва имеет вид

$$\begin{aligned} F &= 2(L + 2B) + H \rightarrow \min \\ L \cdot B \cdot H &= 2000 \\ 0 < L; B; H < \infty \end{aligned} \quad (7.23)$$

Результаты решения задач с математическими моделями (7.22) и (7.23) приведены в табл. 7.3.

Т а б л и ц а 7.3

Целая функция	$L, \text{м}$	$B, \text{м}$	$H, \text{м}$	$S, \text{м}^2$	$l, \text{м}$
S_{\min}	1,26	1,26	1,26	9,53	8,8
l_{\min}	1,26	0,68	2,52	11,11	7,6

Из анализа данных, приведенных в таблице 7.3, видно, что в зависимости от требуемой постановки задачи (минимальная площадь материала, расходуемого на изготовление бака $V = 2000$ л, или минимальная общая протяженность сварочного шва) требуется изготавливать различные конструкции масляных баков.

Минимальная площадь $S = 9,53 \text{ м}^2$ имеет бак кубической формы со сторонами 1,26 м, а минимальную протяженность сварочного шва $l = 7,6$ м имеет бак со сторонами $L = 1,26$ м, $B = 0,63$ м, $H = 2,52$ м.

Чтобы учесть одновременно стоимость листового материала и стоимость сварочных работ, необходимо определить суммарную технологическую себестоимость $C = \alpha S + \beta l$.

Математическая модель оптимизационной задачи, предусматривающей определение размеров бака L, B, H с максимальным объемом и

минимальной протяженностью сварочного шва при заданных значениях α, β и $C_{\text{зад}}$, имеет вид

$$\begin{aligned}
 F_1 = V &\rightarrow \max \\
 V - L \cdot B \cdot H &= 0 \\
 S - 2[L \cdot B + (L + B)H] &= 0 \\
 C - \alpha S - \beta l &= 0 \\
 l - 2(L + 2B) - H &= 0 \\
 0 < L, B, H, S, l < \infty \\
 C &= C_{\text{зад}}.
 \end{aligned}
 \tag{7.24}$$

При решении задачи с заданной математической моделью при заданных значениях $\alpha = 0,1$, $\beta = 0,8$, $C_{\text{зад}} = 3,4,5,6$ получены следующие оптимальные величины технологических параметров (табл. 7.4).

Т а б л и ц а 7.4

$C_{\text{зад}}$	$V, \text{м}^3$	$L, \text{м}$	$B, \text{м}$	$H, \text{м}$	$S, \text{м}^2$	$l, \text{м}$
3	0,19	0,57	0,30	1,10	2,26	3,46
4	0,42	0,74	0,40	1,42	3,80	4,51
5	0,78	0,90	0,49	1,71	5,70	5,47
6	1,27	1,07	0,59	2,00	7,91	6,51

7.8. ОПТИМИЗАЦИЯ ЗАГРУЗКИ МЕТАЛЛОРЕЖУЩИХ СТАНКОВ

Требуется оптимизировать загрузку зубошлифовальных станков при изготовлении партии зубчатых колес ($m = 3 \text{ м}$, $Z = 45$, $\alpha = 20^\circ$) шестой степени точности в количестве 50 шт.

В механическом цехе имеется один зубофрезерный 5Д32 и один зубодолбежный 5А12 станок, три зубошлифовальных 5851 типа (МААГ), 5831 (НАИЛС) и 5833 (Рейсхауэр).

Технологические возможности станков: за отведенный календарный промежуток времени на зубофрезерном станке 5Д32 можно обработать 20 зубчатых колес (8-й степени точности), а на зубодолбежном – 30 зубчатых колес (9-й степени точности), зубошлифовальный 5831 может обработать 26 зубчатых колес, 5833 – 14 колес и 5851 – 10 колес.

Стоимость шлифования зубчатых венцов на различных типах зубошлифовальных станков представлена в табл. 7.5.

Т а б л и ц а 7.5

Тип станка и степень точности	Модели зубошлифовальных станков		
	5831	5833	5851
9-я степень, зубодолбление 5А12	0,6 гр	0,9 гр	1,5 гр
8-я степень, зубофрезерование 5Б32	0,4 гр	0,8 гр	1,4 гр

Количество деталей, распределенное между зубошлифовальными станками, приведено в табл. 7.6

Т а б л и ц а 7.6

Тип станка	5831	5833	5851
5А12	X	Y	$30-X-Y$
5Б32	$26-X$	$14-Y$	$X+Y-20$
Сумма	26	14	10

Технологическая себестоимость зубошлифовальных работ при обработке 50 зубчатых колес шестой степени точности равна

$$C = 0,6X + 0,9Y + 1,5 \cdot (30 - X - Y) + 0,4 \cdot (26 - X) + 0,8 \cdot (14 - Y) + 1,4 \cdot (X + Y - 20).$$

$$C = 40,6 + X - Y.$$

Количество прошлифованных деталей на станках не может быть отрицательной величиной

$$\begin{cases} X \geq 0 \\ Y \geq 0 \\ 30 - X - Y \geq 0 \end{cases}, \quad \begin{cases} 26 - X \geq 0 \\ 14 - Y \geq 0 \\ X + Y - 20 \geq 0 \end{cases}.$$

Приведенные неравенства являются уравнениями прямых линий, построение которых на графике (рис.7.5) позволяет оптимизировать целевую функцию C . $C \rightarrow \min$.

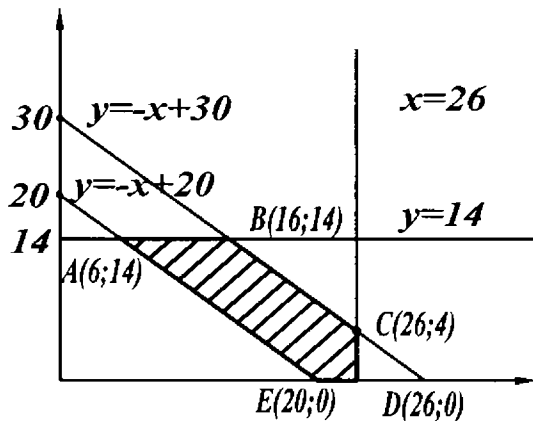


Рис. 7.5. Область допустимых значений оптимизируемых параметров

Технологическая себестоимость в критических точках A, B, C, D, E равна:

$$C_A = 40,6 + 6 - 14 = 32,6 \text{ гр.}$$

$$C_B = 40,6 + 16 - 14 = 42,6 \text{ гр.}$$

$$C_C = 40,6 + 26 - 4 = 62,6 \text{ гр.}$$

$$C_D = 40,6 + 26 = 66,6 \text{ гр.}$$

$$C_E = 40,6 + 20 = 60,6 \text{ гр.}$$

Следовательно, наиболее экономичным вариантом распределения зубчатых колес между зубошлифовальными станками является вариант, соответствующий C_A . Распределение деталей между станками по данному варианту приведено в табл. 7.7.

Т а б л и ц а 7.7

Тип станка	5831	5833	5851
5А12	$X = 6$	$Y = 14$	$30 - 6 - 14 = 10$
5Б32	$26 - 6 = 20$	$14 - 14 = 0$	$6 + 14 - 20 = 0$

Заработная плата шлифовальщиков за указанный календарный промежуток времени составит:

1. Зубошлифовальщик, работающий на станке 5831:

$$X \cdot 0,6 + (26 - X) \cdot 0,4 = 3,6 + 8 = 11,6 \text{ гривны.}$$

2. Зубошлифовальщик, работающий на станке 5833:

$$Y \cdot 0,9 = 14 \cdot 0,9 = 12,6 \text{ гривны.}$$

3. Зубошлифовальщик, работающий на станке 5851:

$$(30 - X - Y) \cdot 1,5 = (30 - 6 - 14) \cdot 1,5 = 15 \text{ гривен.}$$

7.9. ОПТИМИЗАЦИЯ ЗАТРАТ НА ПЕРЕВОЗКУ ЗАГОТОВОК

Литейный цех завода располагается на расстоянии a от железной дороги (пункт C на рис. 7.6). Механический цех, куда поставляются из литейного цеха заготовки, находится в пункте A , расположенном по прямой линии от литейного цеха на расстоянии b . Заготовки из литейного цеха сначала автомобильным транспортом перевозятся на станцию B , а затем железнодорожным транспортом из пункта B перевозятся в механический цех A .

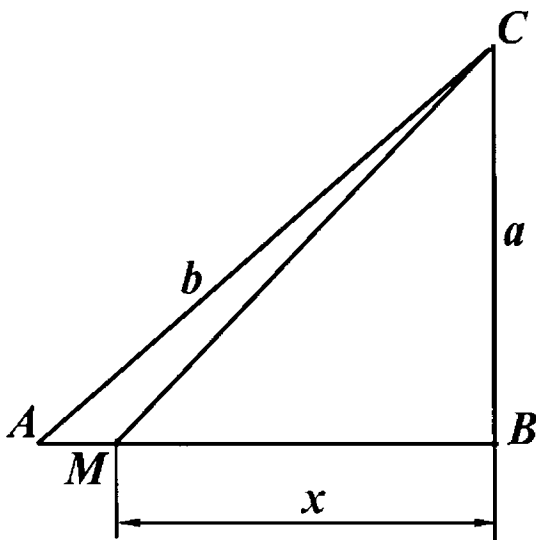


Рис.7.6. Расчетная схема

Стоимость весовой единицы, перевезенной на единицу расстояния по железной дороге, равна α , а по шоссе – β . Причем $\beta = 1,3\alpha$.

Требуется определить, в какой точке железной дороги следует открыть новую станцию M и к ней подвести по прямой линии шоссе CM , чтобы общие транспортные расходы были минимальны.

Решение:

Пусть $BM = x$,

$BC = a$, $AC = b$, тогда

$$AB = \sqrt{b^2 - a^2},$$

$$AM = AB - BM = \sqrt{b^2 - a^2} - x, \quad CM = \sqrt{a^2 + x^2}.$$

Стоимость перевозки P единиц литейных заготовок по железной дороге AM составит $P\alpha(\sqrt{b^2 - a^2} - x)$, а по шоссе на расстояние MC – $P\beta \cdot \sqrt{a^2 + x^2}$.

Общая стоимость перевозок по маршруту CMA выражается функцией

$$S(x) = P\alpha(\sqrt{b^2 - a^2} - x) + P\beta \cdot \sqrt{a^2 + x^2}, \quad (7.25)$$

где $0 \leq x \leq AB$ или $0 \leq x \leq \sqrt{b^2 - a^2}$.

Функция (7.25) является целевой функцией задачи.

Требуется найти такое значение аргумента x , при котором функция $S(x)$ примет наименьшее значение на отрезке $(0, \sqrt{b^2 - a^2})$.

Производная функции (7.25) равна

$$S'(x) = -P\alpha + \frac{P\beta x}{\sqrt{a^2 + x^2}} = \frac{P(\beta x - \alpha\sqrt{a^2 + x^2})}{\sqrt{a^2 + x^2}}.$$

Приравнивая первую производную функции $S(x)$ к нулю

$$\frac{P(\beta x - \alpha\sqrt{a^2 + x^2})}{\sqrt{a^2 + x^2}} = 0, \quad (7.26)$$

получим

$$x_1 = \frac{a\alpha}{\sqrt{\beta^2 - \alpha^2}},$$

$$x_2 = -\frac{a\alpha}{\sqrt{\beta^2 - \alpha^2}}.$$

Так как x_2 не принадлежит области определения, то на отрезке $(0, \sqrt{b^2 - a^2})$ функция $S(x)$ имеет единственную критическую точку

$$x_1 = \frac{a\alpha}{\sqrt{\beta^2 - \alpha^2}}.$$

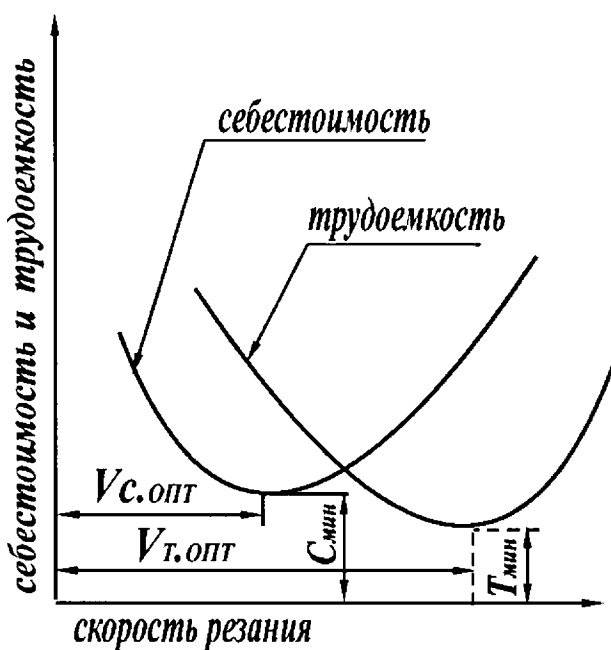
В точках $x_3 = \frac{a\alpha}{2\sqrt{\beta^2 - \alpha^2}}$ и $x_4 = \frac{2a\alpha}{\sqrt{\beta^2 - \alpha^2}}$ слева и справа от критической точки производная меняет знак с минуса на плюс.

Следовательно, при $x = \frac{a\alpha}{\sqrt{\beta^2 - \alpha^2}}$ стоимость провоза заготовок по маршруту *СМА* имеет минимальное значение. Подставляя $\beta = 1,3\alpha$, получим $x = \frac{a}{0,69}$.

7.10. ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

Оптимизация – это процесс нахождения экстремума некоторой количественной величины объекта исследования, представляемой в виде функций.

Основной целью процесса является обеспечение заданных характеристик качества изделий наиболее производительным путем при минимальных затратах. Отсюда вытекают два главных критерия оптимальности: максимальная производительность и минимальная себестоимость.



Следует заметить, что оптимальные режимы обработки, дающие наибольшую производительность, как правило, не обеспечивают минимальную себестоимость.

На рис.7.7 представлена зависимость трудоемкости и себестоимости обработки от скорости резания. С увеличением скорости резания трудоемкость и себестоимость обработки сначала снижаются, а затем, перейдя некоторые минимальные значения $V_{с}^0$ и $V_{т}^0$, возрастают (в связи с увеличением износа режущего инструмента и затрат на его замену).

Рис. 7.7. Зависимость технологической себестоимости и штучного времени

При этом важно отметить, что оптимальные скорости резания, соответствующие минимальным затратам времени $T_{мин}$ и минимальной себестоимости $C_{мин}$, не совпадают. Скорость резания, оптимальная по себестоимости, всегда меньше оптимальной скорости по производительности.

Выбор скорости резания по наибольшей производительности или наименьшим затратам осуществляется для каждого конкретного случая с учетом сложившейся обстановки.

Сопоставление эффективности технологических вариантов по критериям производительности и себестоимости может привести в ряде случаев к различным выводам.

Например, при сопоставлении растачивания отверстия зубчатого колеса из стали 12Х2Н4А диаметром $\varnothing 30_{+0,1}$ по 7-му качеству точности с шероховатостью $Rz = 6,3$ мкм на токарном станке 1К62 и протягивания получены следующие данные [18]:

Технологическая стоимость, руб.	
при протягивании.....	0,11,
при растачивании.....	0,11.
Трудоемкость (штучно-калькуляционное время, мин)	
при протягивании.....	1,05,
при растачивании.....	3,63.

Приведенный пример показывает, что при сопоставлении эффективности технологических процессов не следует ограничиваться только определением себестоимости обработки.

Учитывая важность этих критериев оптимальности, следует решать задачу поиска компромисса между ними. В этом случае приходится решать задачу многокритериальной оптимизации.

7.11. НАУЧНЫЙ ПОДХОД К ВЫБОРУ ОПТИМАЛЬНЫХ СПОСОБОВ ОБРАБОТКИ

Связь между производительностью Q и точностью обработки y выражается зависимостью [90]

$$Q = (y \cdot k)^3 \cdot \left(\frac{\cos \varphi}{4 \cdot t \cdot \rho \cdot HV} \right)^2 \cdot \frac{V_{рез}}{\tau_{сдв}}, \quad (7.27)$$

где $Q = a_z \cdot b \cdot V_{рез}, \text{ м}^3 / \text{с}$; a_z – толщина среза, м; b – ширина резания, м; $V_{рез}$ – скорость резания, м/с; t – глубина резания, м; φ – угол в плане резца или абразивного зерна; ρ – радиус округления вершины резца (абразивного зерна); HV и $\tau_{сдв}$ – соответственно твердость и прочность на сдвиг обрабатываемого материала, Па; k – приведенная жесткость технологической системы, н/м; y – величина упругого перемещения режущей кромки резца (зерна) в радиальном направлении.

Этот параметр, как известно из исследований [90], определяется зависимостью

$$y = \frac{\rho^{1,33} \cdot b}{k} \cdot (4 \cdot HV)^{0,67} \cdot (a_z \tau_{сдв})^{0,33}. \quad (7.28)$$

Наибольшее влияние на Q оказывают величины y и k , входящие в выражение (7.27) в третьей степени.

С увеличением производительности уменьшается точность. Следовательно, при сохранении требуемой точности увеличить производительность можно за счет применения оборудования повышенной жесткости. Если возможности увеличения жесткости ограничены, то можно производительность увеличить за счет уменьшения глубины резания t , радиуса закругления ρ и угла в плане φ , которые входят в выражение (7.27) во второй степени. Для увеличения производительности Q надо изыскать способ, стабилизирующий режущую способность инструментов во времени, т. е. способ, сохраняющий высокую остроту режущей кромки инструмента. Например, для поддержания в процессе шлифования высокой остроты режущих зерен круга надо использовать методы, которые в процессе шлифования осуществляют самозатачивание круга. К таким методам можно отнести прерывистое шлифование или введение в зону резания дополнительной электрической энергии в форме электроимпульсных разрядов или электрохимического растворения металлической связки круга.

На производительность обработки оказывают существенное влияние прочность $\tau_{сдв}$ и твердость HV обрабатываемого материала. С увеличением этих параметров производительность уменьшается. Этим объясняются трудности, связанные с обработкой деталей из высокотвердых и высокопрочных материалов. С увеличением скорости резания $V_{рез}$ при точении прямо пропорционально увеличивается Q . Однако увеличение скорости $V_{рез}$ ограничено действием возникающих при резании тепловых процессов, которые приводят, во-первых, к ухудшению качества обрабатываемых поверхностей, во-вторых, – к потере режущих свойств инструмента: износу, затуплению зерен круга и увеличению ρ , что, согласно зависимости (7.27), снижает производительность Q .

Как видим, производительность обработки Q определяется механическими и тепловыми процессами, происходящими в зоне реза-

ния. Существует связь скорости $V_{рез}$ и радиуса округления ρ с производительностью обработки Q . С увеличением скорости производительность возрастает, а с увеличением радиуса ρ – уменьшается.

Пропорционально соотношению $V_{рез}/\rho^2$ изменяется производительность обработки. Следовательно, существует оптимальное соотношение $V_{рез}/\rho^2$, которому соответствует максимальная производительность.

Для повышения производительности обработки необходимо обеспечить условия стабилизации стружкообразования, которое характеризуется отношением a_z/ρ . Этот параметр определяется из зависимости

$$\frac{a_z}{\rho} = \left(\frac{y \cdot k \cdot \sin \varphi}{t \cdot \rho} \right)^3 \cdot \frac{1}{(4 \cdot HV)^2 \cdot \tau_{сдв}}. \quad (7.29)$$

Для поддержания заданного значения a_z/ρ , необходимо производить управление процессом резания за счет стабилизации ρ по времени. Стабилизацию ρ осуществляют: путем применения адаптивных систем, непрерывной правки шлифовальных кругов и увеличения жесткости упругой системы «к».

Из зависимостей (7.27) и (7.29) просматривается одинаковый характер влияния параметров процесса на Q и отношение a_z/ρ . Следовательно, для поддержания производительности во времени необходимо стабилизировать отношение a_z/ρ . Проведенный теоретический анализ указывает основные направления для увеличения производительности при сохранении требуемого качества поверхностного слоя.

7.12. ОПТИМИЗАЦИЯ УСЛОВИЙ ПРИМЕНЕНИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Снижение себестоимости и повышение производительности и качества изготовления деталей относятся к числу основных проблемных вопросов технологии машиностроения. Существует много технических решений, связанных с созданием прогрессивных методов обработки деталей с применением сложных технологических автома-

тизированных систем. Для анализа их возможностей рассмотрим зависимость технологической себестоимости, учитывающую затраты на заработную плату и стоимость режущего инструмента

$$C = N \cdot \tau \cdot S_1 \cdot k_d + M \cdot \varphi, \quad (7.30)$$

где N – годовая программа выпуска изделий; $\tau = \tau_1 + \tau_2$ – время обработки, с; τ_1, τ_2 – основное и вспомогательное время обработки, с; S_1 – тарифная ставка рабочего, час; k_d – коэффициент, учитывающий начисления на тарифную ставку рабочего; M – количество израсходованных инструментов; φ – цена инструмента.

Принимая $\tau_1 = l/S$, $\tau_2 = 0$, получим: $T = n\tau_1$; $T = \frac{A}{S^k}$,

где l – длина технологического перехода, м; S – скорость подачи инструмента, м/с; T – стойкость инструмента, с; n – количество переходов; A, k – параметры, зависящие от условий обработки, устанавливаются экспериментально, с учетом $M = \frac{N}{n}$ и $n = \frac{A}{l} \cdot \frac{1}{S^{k-1}}$,

имеем

$$C = N \cdot l \cdot \left(\frac{S_1 \cdot k_d}{S} + \frac{\varphi}{A} \cdot S^{k-1} \right). \quad (7.31)$$

В зависимости от показателя степени k себестоимость с увеличением S может уменьшаться ($k \leq 1$) или изменяться по экстремальной зависимости ($k > 1$), проходя точку минимума. Приравнивая производную $C'_S = 0$ к нулю, получим экстремальное значение подачи $S_{\text{экс}}$

$$S_{\text{экс}} = \left[\frac{S_1 \cdot A \cdot k_d}{(k-1) \cdot \varphi} \right]^{\frac{1}{k}}. \quad (7.32)$$

Минимальное значение себестоимости обработки $C_{\text{экс}}$ равно

$$C_{\text{экс}} = N \cdot l \cdot S_1 \cdot k_d \cdot \frac{k}{(k-1)} \left[\frac{(k-1) \cdot \varphi}{S_1 \cdot k_d \cdot A} \right]^{\frac{1}{k}}. \quad (7.33)$$

Влияние параметров N и l на $C_{\text{экс}}$ более значительно по сравнению с параметрами S_1 , k_{∂} , u и A при $k > 1$. Уменьшить себестоимость можно за счет оптимизации траектории перемещения инструмента при обработке сложных деталей на станках с ЧПУ. Применение станков с ЧПУ снижает затраты на изготовление оснастки, но при этом возникают дополнительные затраты на подготовку управляющих программ u_2 и стоимость станка u_1

$$C_{\text{экс}} = N \cdot l \cdot S_1 \cdot k_{\partial} \cdot \frac{k}{(k-1)} \left[\frac{(k-1) \cdot u}{S_1 \cdot k_{\partial} \cdot A} \right]^{\frac{1}{k}} + u_1 + u_2. \quad (7.34)$$

Известно, что станки с ЧПУ эффективно применяют при изготовлении сложных деталей.

При обработке деталей на многолезцовых станках технологическая себестоимость определяется по формуле [90]

$$C = N \cdot l \cdot \left(\frac{S_1}{z} \cdot \frac{k_{\partial}}{S} + \frac{u}{A} \cdot S^{k-1} \right) + u_3, \quad (7.35)$$

где z – количество одновременно работающих инструментов;
 u_3 – стоимость многолезцового станка.

Приравняв производную $C'_s = 0$ к нулю, получим экстремальное значение подачи многолезцового станка

$$S_{\text{экс}} = \left[\frac{S_1 \cdot A \cdot k_{\partial}}{(k-1) \cdot z \cdot u} \right]^{\frac{1}{k}}. \quad (7.36)$$

Экстремальное значение технологической себестоимости можно представить в виде следующей зависимости

$$C_{\text{экс}} = N \cdot l \cdot S_1 \cdot k_{\partial} \cdot \frac{1}{z} \cdot \frac{k}{(k-1)} \left[\frac{(k-1) \cdot z \cdot u}{S_1 \cdot k_{\partial} \cdot A} \right]^{\frac{1}{k}} + u_3. \quad (7.37)$$

Из анализа полученных зависимостей (7.36) и (7.37) видно, что с увеличением числа одновременно работающих инструментов $S_{\text{экс}}$ и $C_{\text{жс}}$ уменьшаются. Для каждого значения N существует оптимальное значение z . Данный анализ справедлив для показателя степени $k > 1$. Для $k \leq 1$ согласно зависимости (7.35) экстремум функции C от S отсутствует. При этих условиях с увеличением подачи S себестоимость непрерывно уменьшается. Ограничением увеличения S является требуемое качество и точность обработки.

Г Л А В А 8

ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ И ЭКОНОМИЧНОСТЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

8.1. ЭФФЕКТИВНОСТЬ СТАНКОВ С ЧПУ И ГИБКИХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СИСТЕМ (ГПС)

Производительность и себестоимость обработки существенно зависят от предъявляемых требований по точности и шероховатости поверхности изготавливаемых деталей. Например, с повышением точности обработки стальных валиков диаметром 10–18 мм на токарно-револьверном станке с 11-го до 7-го качества, суммарные затраты возрастают в три раза [7]. Особенно резко увеличиваются затраты времени на контроль заготовок. Кроме того, с повышением точности появляется брак, затраты на который составляют 2 – 3% от общей стоимости обработки. При повышении точности обработки до шестого качества точности затраты на брак достигают 30% от стоимости обработки заготовок [18].

Заданная чертежом точность и требуемая шероховатость поверхности могут быть достигнуты различными способами обработки. Например, отверстие 9-го качества точности с $Rz = 6,3$ мкм можно получить при растачивании быстрорежущими и твердосплавными резцами, развертыванием, шлифованием, протягиванием, прошивкой, хонингованием и раскаткой шариками или роликами.

Следует заметить, что каждый из указанных методов имеет различную производительность. Технолог при разработке технологии должен выбрать наиболее экономичный метод обработки.

При выборе метода нужно учитывать не только трудоемкость (штучно-калькуляционное время), но и технологическую себестоимость. Кроме того, при выборе метода обработки надо учитывать программу выпуска изделий (тип производства: массовый, серийный,

единичный). Например, если требуется изготовить три – четыре детали, – экономически оправдано применять расточку на универсальном оборудовании. Если количество деталей исчисляется сотнями тысяч предпочтение следует отдать протягиванию отверстия.

На современном этапе развития технологии машиностроения как науки экономичность технологических процессов становится ее неотъемлемой составной частью, равнозначной таким разделам, как учение о точности, качестве и производительности. В условиях рыночной экономики наиболее важной задачей, решаемой при разработке технологических процессов, является задача технического нормирования рабочего времени, т. е. нормирования труда.

Техническое нормирование труда – это совокупность методов и приемов по выявлению резерва рабочего времени и установлению необходимой меры труда.

Техническая норма времени служит основой для определения требуемого качества выпускаемой продукции, количества оборудования и рациональной его загрузки, производственной мощности участков и цехов, расчета основных показателей по труду и заработной плате, а также является основой для оперативного (календарного) планирования.

При внедрении станков с ЧПУ, гибких производственных систем ГПС необходимо оценивать стратегические принципы перестройки машиностроительного производства. Главными источниками технико-экономической эффективности при внедрении ГПС являются: повышение коэффициента загрузки с 0,4...0,6 до 0,85...0,9; повышение коэффициента сменности с 1,3...1,6 до 2,0...3,0; уменьшение вложений в оборотные фонды благодаря сокращению в несколько раз производственного цикла, уменьшение количества производственного и обслуживающего персонала в 1,7...2 раза, практическая реализация безлюдной технологии обработки.

Выполнение перечисленных технико-экономических показателей требует повышения надежности функционирования всех элементов ГПС, оснащения комплекса системами автоматического контроля качества обработки деталей, состояния инструмента, диагностики неисправности инструмента. Для гибкого автоматизированного производства характерен высокий уровень капитальных вложений. Для окупаемости этих затрат от предприятия требуется непрерывный ежегодный рост показателей экономической эффективности.

Основные показатели экономической эффективности от применения ГАП подразделяются на три группы.

В первую группу входят показатели, характеризующие технологичность конструкции детали, которая оценивается по коэффициентам сложности и требуемой точности обработки.

Во вторую группу входят следующие показатели: годовой объем выпуска деталей, коэффициент закрепления операций и рабочих мест, тип производства.

Третья группа определяет показатели социальной эффективности: повышение уровня автоматизации и механизации труда работающих; рост энерговооруженности труда; повышение интеллектуального уровня труда; уменьшение текучести кадров; снижение заболеваемости и травматизма рабочих; повышение эстетичности средств в помещениях и др.

Первая группа затрат связана с показателями эффективности прямой экономии. Источниками эффективности здесь являются повышение производительности оборудования, увеличение сменности его работы и коэффициентов загрузки и др.

Вторая группа затрат, учитывающая косвенные источники экономической эффективности, отражает изменение организационной структуры предприятия. Она включает технологическую подготовку производства, обработку информации, управление и обслуживание.

Главными статьями косвенной экономики становятся: ускорение производственного цикла с уменьшением межоперационных заделов; снижение уровня незавершенного производства; снижение уровня складских запасов и затрат на их хранение; уменьшение затрат труда на ремонтные работы; повышение эффективности обработки информации; снижение затрат на реконструкцию производства [35].

Экономия от источников эффективности, имеющих социальное и народно-хозяйственное значение, проявляется в результате улучшения качества выпускаемой продукции, повышения ее конкурентоспособности и определения конъюнктуры рынка.

При оценке экономической эффективности ГПС производится сопоставление эффективности ее работы с отдельно работающими станками ЧПУ.

Повышение производительности наблюдается при обработке изделий, требующих больших затрат на переналадку оборудования и вложения оборотных средств, связанных с незавершенным производством.

Потери времени на переналадку станков с ЧПУ зависят от трудоемкости изготовления детали. Если обработка осуществляется малыми партиями, то потери на переналадку автономных станков с ЧПУ увеличиваются, а при обработке больших партий – уменьшаются.

С другой стороны, с увеличением партии деталей увеличивается объем незавершенного производства, что приводит к росту оборотных средств. Поэтому важным становится вопрос об определении оптимальной величины запуска деталей в производство.

В табл. 8.1 приведены усредненные технико-экономические показатели применения автономных станков с ЧПУ, обрабатывающих центров, ГПМ и гибкой производственной системы (ГПС), сформированной на базе этих станков [36].

Применение в составе ГПС обрабатывающих центров позволяет в 2...3 раза увеличить производительность труда, в 2...5 повысить суточную отдачу станков при сокращении числа обслуживающего персонала по сравнению с универсальными станками.

Т а б л и ц а 8.1

Технико-экономические показатели	Станок ЧПУ	Обрабат. центр	ГПС
1.Повышение производительности по сравнению с универсальным оборудованием, раз	2–3	3–5	6–8
2.Число высвобожденных рабочих при многостаночном обслуживании, чел.	4	7	50–90
3. Сокращение используемого оборудования, раз	3–4	3–6	7–10

Следует заметить, что для гибкого автоматизированного производства характерен высокий уровень начальных капитальных вложений. Вполне понятно, что от таких капиталовложений требуется соответствующая отдача.

Показателен пример японской фирмы «Ямазаки», приведенный в работе [37]. В результате внедрения ГПС механообработки, число станков фирмы уменьшилось с 68 до 18, занимаемая оборудованием площадь сократилась в три раза, число работников уменьшилось с

215 до 12 человек, время обработки изделия сократилось в среднем с 35 до 1,5 дня. Однако из 18 млн. долларов, которые были затрачены при создании ГПС, через два года окупилось только 6,8 млн. долларов.

Из приведенного примера следует, что при внедрении ГПС, помимо ощутимой за короткое время выгоды, необходимо оценивать стратегические принципы перестройки машиностроительного производства на базе применения технологии нового поколения.

8.2. СТРУКТУРА НОРМЫ ВРЕМЕНИ

В машиностроении норма времени обычно устанавливается на технологическую операцию.

Согласно ГОСТу 3.1109 – 82, нормой времени называется регламентированное время выполнения некоторого объема работ в определенных производственных условиях одним или несколькими исполнителями соответствующей квалификации. Технически обоснованная норма времени оценивается штучно-калькуляционным временем $T_{ш.к}$

$$T_{ш.к} = T_{ш} + \frac{T_{п.з.}}{n}, \quad (8.1)$$

где $T_{ш.к}$ – штучно-калькуляционное время; $T_{ш}$ – норма штучного времени; $T_{п.з.}$ – подготовительно-заключительное время на партию обрабатываемых заготовок; n – количество деталей в партии.

Штучное время равно отношению времени цикла технологической операции к числу одновременно изготавливаемых изделий.

Норма штучного времени $T_{ш}$ подсчитывается по формуле

$$T_{ш} = T_0 + T_в + T_{обс} + T_{отд} = T_{оп} + T_{обс} + T_{отд}, \quad (8.2)$$

где T_0 – время, в течение которого осуществляется изменение размеров и формы заготовки, внешнего вида и шероховатости поверхности.

Основное время может быть машинным, машинно-ручным и аппаратным.

При всех станочных работах основное время определяется отношением величины пути, пройденного обрабатываемым инструментом, к его минутной подаче

$$T_0 = T_M = \frac{L_i}{S_{\min}} = \frac{L_i}{n \cdot S} = \frac{Lz}{n \cdot S \cdot t}, \quad (8.3)$$

$$L = l + l_1 + l_2,$$

где T_M – машинное время, мин; L – длина пути инструмента, мм; l – длина обрабатываемой поверхности, мм; l_1 – величина врезания инструмента, мм; l_2 – величина перебега (схода) инструмента, мм; i – число ходов; S_{\min} – подача, мм/мин; n – частота вращения шпинделя или фрезы; z – припуск на сторону.

При расчете основного времени по формуле (8.3) элементы режима резания n , S , t определяются по формулам теории резания или по таблицам нормативов [38].

Вспомогательное время включает затраты времени на установку и снятие заготовки, время на перемещение частей станка, на изменение режима работы станка, время на смену инструмента и измерение размеров.

Время обслуживания рабочего места $T_{\text{обс}}$ представляет собой часть штучного времени, затрачиваемую исполнителем на поддержание средств технического оснащения в работоспособном состоянии и уход за рабочим местом.

В условиях массового производства время обслуживания рабочего места подразделяется на время технического обслуживания и время организационного обслуживания.

Время технического обслуживания $T_{\text{тех}}$ – это время, затрачиваемое на уход за рабочим местом (оборудованием), смену затупившегося инструмента, подналадку оборудования в процессе работы, уборку стружки из зоны обработки и т. д. Это время определяется в процентах к основному времени.

Время организационного обслуживания $T_{\text{орг}}$ – это время, затрачиваемое на уход за рабочим местом в течение рабочей смены: время на подготовку инструмента в начале смены, осмотр оборудования,

смазку и чистку оборудования после окончания работы. Это время также определяется в процентах по отношению к основному времени.

Время отдыха $T_{отд}$ – это часть штучного времени, затрачиваемая на личные потребности человека. Это время не превосходит 2 % от продолжительности рабочей смены.

В единичном и серийном производствах норма времени определяется по формуле (8.1). В связи с тем, что в единичном и серийном производствах время на обслуживание рабочего места не подразделяется на организационное и техническое, формула для подсчета штучного времени упрощается и приобретает вид

$$T_{ш} = (T_o + T_B) \left(1 + \frac{k}{100} \right), \quad (8.4)$$

где k – процент оперативного времени на обслуживание рабочего места, отдых и личные потребности.

На машиностроительных заводах производительность обработки оценивается по штучному или штучно-калькуляционному времени. По времени, которое затрачивается на обработку, обычно судят о том, какой метод является наиболее экономичным. Однако следует отметить, что различные технологические процессы обработки металлов, начиная от обработки металлов давлением до физико-химических методов, имеют различные энергозатраты. В табл.8.2 представлены результаты удельной энергии технологических операций [88].

Механическая работа оценивается произведением пути L на силу F . $A = L \cdot F$. Если путь инструмента можно определить расчетным путем, то сила резания определяется из эксперимента.

Специалисты по технологии машиностроения знают, что есть “выгодная” и “невыгодная” работа. За этим производственным понятием скрывается различие в мощности, затрачиваемой на выполнение работы. Например, меньшее время удаления постоянного припуска требует большей затраты энергии: $t_M = A \cdot p^{-1}$.

Технологи, доказывая полезность и необходимость концентрации переходов (операций), в качестве аргумента выдвигают очевидный факт – уменьшение времени процесса обработки.

Рассмотрим обработку ступенчатого валика, имеющего n ступеней, на токарно-винторезном станке 1К62.

Таблица 8.2

№ п/п	Операции	Энергетические затраты на обработки, Дж/(с·м ³)	Площадь поперечного сечения среза, мм ²	Скорость резания, м/с
1	Холодная гибка	$(0,5 \div 1,0) \cdot 10^1$	—	—
2	Холодная штамповка	$(1,2 \div 1,7) \cdot 10^1$	—	—
3	Холодное вдавливание	$(1,5 \div 1,9) \cdot 10^2$	—	—
4	Точение	$(0,5 \div 0,7) \cdot 10^3$	1,0	1,5 ÷ 7,5
5	Протягивание	$(2,5 \div 3,7) \cdot 10^3$	0,5	0,01 ÷ 0,1
6	Фрезерование	$(5,0 \div 7,5) \cdot 10^3$	0,3	2 ÷ 6
7	Шлифование	$(5,5 \div 7,0) \cdot 10^4$	0,00005	25 ÷ 50
8	Электрохимическое шлифование	$(1,2 \div 1,5) \cdot 10^5$	—	—
9	Ультразвуковая обработка	$(1,3 \div 1,8) \cdot 10^5$	—	—

При последовательной обработке участков ступенчатого вала, имеющего длину каждой ступени l_i с силой резания F , работа, затрачиваемая на обработку, будет равна

$$A_{\text{оп}_1} = F \left(n \sum_{i=1}^n l_i \right).$$

При обработке на многорезцовом станке общий путь L будет равен длине максимальной ступени. Сила резания при одновременной обработке всеми резцами, установленными на переднем суппорте, будет равна (nF) . Работа затрачиваемая на резание будет равна

$$A_{\text{оп}_2} = L(nF).$$

В обоих вариантах суммарная работа, затрачиваемая на резание, будет одинакова

$$A_{\text{оп}_1} = A_{\text{оп}_2}.$$

Однако второй вариант имеет в n раз меньшее время на обработку.

Постоянство работы на операциях одной физической природы подтверждает закон сохранения энергии. Платить надо за энергию, а не за время. Следовательно, сбережение энергоресурсов коренным образом изменяет подход к оценке эффективности действующих и проектируемых технологических процессов в машиностроении.

В процессе изготовления деталей материал подвергается деформированию при обработке давлением (ковка, штамповка); деформированию и релаксации при обработке резанием (точение, фрезерование, протягивание и др.); диффузии, адгезии в физических процессах; молекулярный, ионный, атомный перенос в химических процессах. Все эти процессы разнообразны по своей природе, и может сложиться такое мнение, что в них нет ничего общего, но это не так. Общим является затрата энергии на процесс обработки, которая измеряется для каждого материала единой по физическому смыслу характеристикой – удельной энергией (работой)

$$A = a \cdot V,$$

где A – работа, затрачиваемая на обработку (Дж); a – удельная работа (Дж/мм³); V – объем материала (мм³).

На примере двух технологических процессов шлифования и тонкого точения рассмотрим их эффективность по энергозатратам.

При удалении одинакового припуска работы, затрачиваемые на шлифование и тонкое точение, определяются из выражений

$$A_{\text{ш}} = a_{\text{ш}} \cdot V; \quad A_{\text{т}} = a_{\text{т}} \cdot V.$$

Из работы Гусарева В.С. [88]

$$a_{\text{ш}} = (5,5 \dots 7,5) \cdot 10^4; \quad a_{\text{т}} = (1,7 \dots 2,5) \cdot 10^3,$$

$$\frac{A_{\text{ш}}}{A_{\text{т}}} = \frac{a_{\text{ш}}}{a_{\text{т}}} = \frac{(5,5 \dots 7,5) \cdot 10^4}{(1,7 \dots 2,5) \cdot 10^3} = 30.$$

Энергозатраты на тонкое точение в 30 раз меньше, чем на шлифование. Следовательно, если позволяют физико-механические свой-

ства материала и предъявляемые требования к точности и шероховатости поверхности деталей, то при разработке технологических процессов желательно назначать для обработки менее энергоемкие процессы.

В работе [89] предложена формула для определения энергозатрат при обработке штучного изделия

$$\mathcal{E} = p_m t_m + aV + p_p t_p,$$

где p_m и t_m – мощность (кВт) и время машинное (с); a – удельная работа (Дж/мм³); V – объем материала (мм³); t_p – время на вспомогательные переходы (с); p_p – удельная энергия рабочего (человека), кДж/с [89].

8.3. ОСОБЕННОСТИ НОРМИРОВАНИЯ МНОГОИНСТРУМЕНТАЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ

При обработке на многорезцовых и многопозиционных станках и на автоматических линиях особенности операции накладывают на режим резания следующие ограничения:

1. Все инструменты должны работать с одинаковой подачей на оборот шпинделя или на один двойной ход.

2. Длина хода для всех инструментов должна быть одинакова, так как резцы закрепляются на одном суппорте.

3. Все инструменты должны работать при одной и той же частоте вращения шпинделя и иметь одинаковую минутную подачу. При обеспечении одинаковой подачи следует иметь в виду, что для некоторых инструментов имеется не только предельно допустимый максимум, но и есть предельно допустимый минимум. Например, при работе на многорезцовых станках твердосплавными резцами подача должна быть не менее 0,04 – 0,05 мм/об.

При работе резцами, оснащенными твердосплавными пластинами Т5К10, Т15К6, Т14КВ, Т30К4 и др., скорости резания должны быть не ниже 40 – 50 м/мин.

Если нет возможности уменьшить время работы лимитирующего суппорта, то подачи остальных суппортов должны быть снижены. Такое выравнивание времени работы суппортов увеличивает стойкость режущих инструментов.

8.4. ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ СЕБЕСТОИМОСТЬ

Цеховая себестоимость технологической операции без учета затрат на заготовку определяется из выражения

$$C_{\text{оп}} = C_{\text{з.с.}} + C_{\text{а}} + C_{\text{рем}} + C_{\text{эн}} + C_{\text{в}} + C_{\text{пр}} + C_{\text{ин}} + C_{\text{п}}, \quad (8.5)$$

где $C_{\text{з.с.}}$ – заработная плата станочника (с начислением в фонд соцстраха); $C_{\text{а}}$ – амортизационные отчисления на замену станка; $C_{\text{рем}}, C_{\text{эн}}, C_{\text{в}}, C_{\text{пр}}, C_{\text{ин}}, C_{\text{п}}$ – затраты на ремонт станка, силовую электроэнергию, вспомогательные материалы, амортизацию и ремонт универсальных приспособлений, амортизацию, ремонт и заточку универсальных инструментов, затраты на эксплуатацию помещения.

Элементы технологической себестоимости можно условно разделить на две группы, одна из которых не зависит ($C_{\text{рем}}, C_{\text{в}}$), а вторая зависит от режимов резания ($C_{\text{з.с.}}, C_{\text{а}}, C_{\text{эн}}, C_{\text{пр}}, C_{\text{ин}}, C_{\text{п}}$).

Вторая группа элементов себестоимости операций пропорциональна штучному времени, поэтому ее можно привести к 1 мин работы оборудования ($C'_{\text{з.с.}}, C'_{\text{а}}, C'_{\text{эн}}, C'_{\text{пр}}, C'_{\text{ин}}, C'_{\text{п}}$). Следовательно, $C_{\text{з.с.}} = C'_{\text{з.с.}} \cdot t_{\text{шт.р}}$; $C_{\text{ин}} = C'_{\text{ин}} \cdot t_{\text{шт.р}}$; $C_{\text{а}} = C'_{\text{а}} \cdot t_{\text{шт.р}}$; $C_{\text{пр}} = C'_{\text{пр}} \cdot t_{\text{шт.р}}$; $C_{\text{п}} = C'_{\text{п}} \cdot t_{\text{шт.р}}$; $C_{\text{эн}} = C'_{\text{эн}} \cdot t_{\text{шт.р}}$.

Введя обозначения $R = C'_{\text{з.с.}} + C'_{\text{а}} + C'_{\text{эн}} + C'_{\text{пр}} + C'_{\text{п}}$, технологическую себестоимость можно представить в виде

$$C_{\text{оп}} = R \cdot t_{\text{шт.р}} + C'_{\text{ин}}. \quad (8.6)$$

Инструментальные расходы на одну деталь можно найти по формуле

$$C'_{\text{ин}} = \frac{P}{q},$$

где q – число деталей, обработанных за период стойкости инструмента T .

$$q = \frac{T}{t_p}. \quad (8.7)$$

Инструментальные расходы, приведенные к одному периоду стойкости

$$p = \frac{S_{\text{ин}}}{n_T} + C_{\text{пер}} + C_{\text{зам.ин}}, \quad (8.8)$$

где $S_{\text{ин}}$ – покупная стоимость инструмента; $C_{\text{пер}}$ – стоимость переточки, приведенная к одному периоду стойкости; n_T – количество периодов стойкости; $C_{\text{зам.ин}}$ – стоимость замены затупившегося инструмента, приведенного к одному периоду стойкости.

После подстановки и преобразований получим

$$C_{\text{оп}} = R \cdot t_{\text{шт.р}} + \frac{t_p}{T} p. \quad (8.9)$$

Штучную производительность, зависящую от режимов резания, можно представить в виде

$$t_{\text{шт.р}} = t_o + t_{\text{см}}, \quad (8.10)$$

где $t_o = \frac{t_p}{\lambda}$; $t_p = \frac{Lh}{\text{Sin}}$.

После подстановки зависимостей (8.10), (8.9), получим

$$C_{\text{оп}} = \frac{Lh}{nSt\lambda} \cdot R + \frac{Lh}{nSt\lambda} \cdot R \cdot \frac{T_{\text{см}}}{T} + p \cdot \frac{Lh}{nSt\lambda} \cdot \frac{1}{T}. \quad (8.11)$$

С учетом преобразований [29], получим

$$C_{\text{оп}} = \frac{Lh}{nSt\lambda} \cdot R + \frac{T_{\text{см}}}{T} \cdot C_1 T^m R + \frac{p}{T} \cdot C_1 T^m. \quad (8.12)$$

Приравнивая частную производную по T (8.12) к нулю, получим

$$\frac{\partial C_{\text{оп}}}{\partial T} = \frac{C_1 R}{\lambda} m T^{m-1} + R T_{\text{см}} C_1 (m-1) T^{m-2} + p C_1 (m-1) T^{m-2} = 0,$$

$$\frac{R}{\lambda} m + R T_{\text{см}} (m-1) T^{-1} + M (m-1) T^{-1} = 0.$$

Откуда

$$T = \frac{(1-m)(RT_{\text{см}} + p)}{mR} \lambda. \quad (8.13)$$

После подстановки (8.13) в выражение (8.11), получим

$$C_{\text{оп}} = \frac{Lh}{nSt} \cdot \left[\frac{R}{\lambda} + \frac{1}{T} (T_{\text{см}} \cdot R - p) \right] = \frac{Lh}{nSt} \cdot \frac{R}{\lambda} \cdot \left(\frac{1}{1-m} \right). \quad (8.14)$$

8.5. ЭКОНОМИЧЕСКОЕ СРАВНЕНИЕ ВАРИАНТОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Сопоставление экономичности вариантов технологических процессов осуществляется путем сравнения себестоимости обработки заготовок, отражающей затраты живого и овеществленного труда.

Расчет экономичности вариантов технологических процессов производится двумя методами: бухгалтерским и элементным.

Бухгалтерский метод расчета экономической эффективности вариантов технологического процесса.

Себестоимость обработки партии заготовок определяется по формуле

$$C = A \cdot n + B, \quad (8.14)$$

где C – себестоимость партии заготовок; n – количество обработанных заготовок в партии, шт; A – текущие затраты, которые повторяются при изготовлении каждой заготовки; B – единовременные затраты, которые производятся один раз на все количество заготовок или периодически на определенную их партию.

Себестоимость обработки одной заготовки в этом случае определяется по формуле

$$C_{\text{заг}} = A + \frac{B}{n}. \quad (8.15)$$

В состав единовременных затрат B , входящих в формулы (8.15) и (8.14), включаются затраты на приобретение специальных станков и инструментов, а также затраты на наладку этих станков.

Текущие затраты A включают в себя: стоимость исходной заготовки $C_{\text{заг}}$, затраты на заработную плату основных рабочих C_3 и все цеховые расходы, связанные с амортизацией и ремонтом оборудования, содержанием зданий, затраты на силовую электроэнергию, затраты на нормальный режущий и мерительный инструменты, затраты на заработную плату инженерно-технических работников и вспомогательных рабочих цеха.

Цеховые расходы определяются в процентах от заработной платы основных рабочих цеха

$$A = C_{\text{заг}} + C_3 \cdot \left(1 + \frac{p}{100}\right), \quad (8.16)$$

где $C_{\text{заг}}$ – стоимость исходной заготовки, включая стоимость материала и ее изготовления, за вычетом стоимости отходов (стружки); p – сумма всех цеховых расходов, выраженная в процентах от заработной платы основных рабочих.

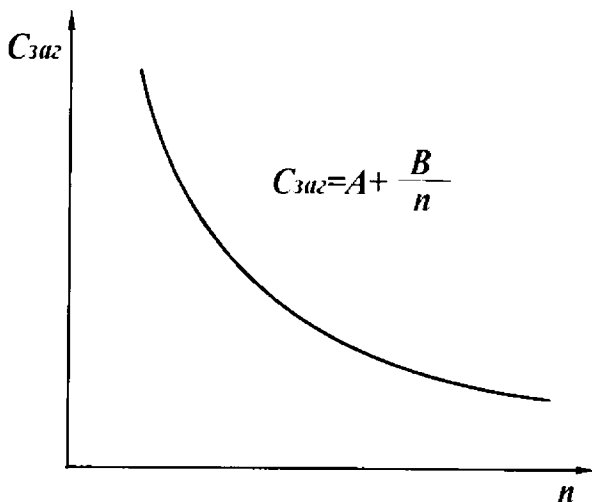


Рис. 8.1. Зависимость технологической себестоимости одной детали от числа обрабатываемых заготовок

Технологическая себестоимость обработки одной детали $C_{\text{заг}}$ согласно формуле (8.15), по мере увеличения количества обрабатываемых заготовок n снижается по гиперболическому закону, асимптотически приближаясь к предельному минимальному значению $C_{\text{кр}}$ (рис. 8.1). Предельное значение технологической себестоимости изменяется в зависимости от величины единовременных затрат B .

Технологический процесс, включающий постоянные единовременные затраты B_1 , при количестве заготовок в партии, превышающем предельное значение n_1 , не может быть реализован. Для его реализации необходимо произвести дополнительные единовременные затраты, например, путем введения в строй дополнительного станка или применения нового режущего инструмента и т. д.

В этих условиях зависимость себестоимости от количества изготавливаемых заготовок будет иметь ступенчатый вид (рис. 8.2).

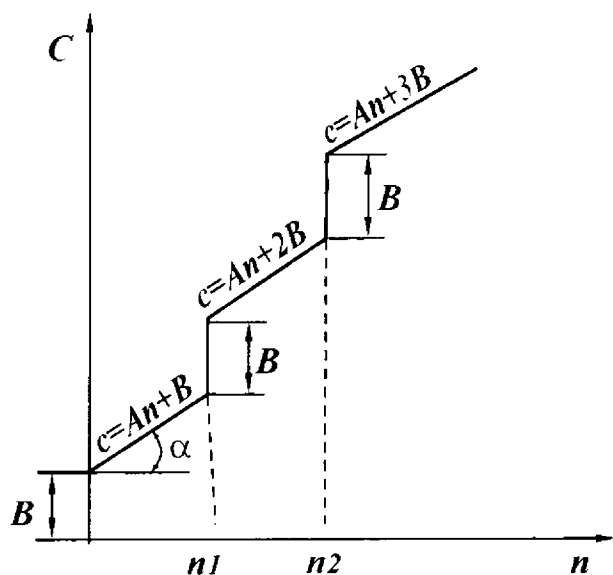


Рис. 8.2. Зависимость технологической себестоимости от числа обрабатываемых деталей

Угол наклона прямых ($C = A \cdot n + B$) относительно оси n обратно пропорционален производительности обработки.

При различных вариантах технологических процессов, имеющих различную производительность обработки, критические значения обрабатываемых заготовок неодинаковы.

При сравнении эффективности проектируемых технологических процессов наилучшим считается тот вариант, который при заданном количестве заготовок имеет наименьшую технологическую себестоимость.

Например, на рис.8.3 представлены три варианта технологических процессов обработки отверстия ($\varnothing 60^{+0,02}$ мм, $Ra-1,25$ мм) протягиванием (кривая 1), растачиванием резцовой головкой (кривая 2) и растачиванием проходным резцом (кривая 3).

Периодически повторяющиеся затраты: B_1 – стоимость протяжки; B_2 – стоимость резцовой головки; B_3 – стоимость резца.

При обработке партии заготовок от $n=1$ до $n=n_1$ наиболее экономично производить расточку отверстия

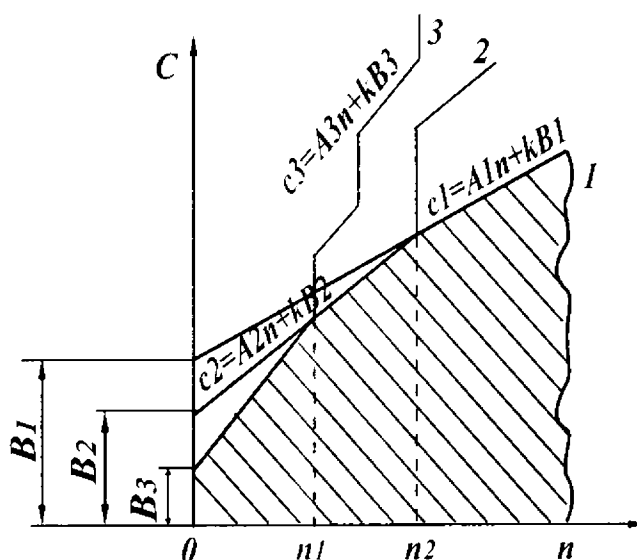


Рис. 8.3. Зависимость технологической себестоимости от числа обрабатываемых деталей: 1 – при протягивании, 2 – при растачивании резцовой головкой, 3 – растачивание резцом

работке партии заготовок от n_1 до n_2 наиболее экономичным считается второй вариант обработки (расточка отверстия резцовой головкой).

При размере партии заготовок $n > n_2$ наиболее экономичным считается первый вариант (протягивание отверстия). На рис.8.3 зона наименьших затрат заштрихована.

Элементный метод. Наиболее точным методом расчета себестоимости вариантов технологических процессов при их сопоставлении считается элементный метод. Расчет технологической себестоимости в этом случае считается по формуле (8.5).

Отдельные слагаемые себестоимости находят не прямым расчетом по точным формулам, а по соответствующим нормативным таблицам.

В качестве примера в табл. 8.3 приведены некоторые данные по элементам затрат на 1 час работы станка из нормативов [34].

Т а б л и ц а 8.3

Тип станка и его характеристика	$C_{з.с}$	$C_{эн}$	$C_{в}$	$C_{рем}$	$C_{а}$	$C_{пр}$	$C_{г}$	$C_{ин}$	$C_{ст.ч}$
1.Токарно-винторезный 1К62 (maxØ 400 мм)	92,7	7,1	1,2	11,2	3,9	9,3	4,1	5,2	134,7
2.Токарный с ЧПУ 16К20	35,3	3,8	1,7	26,5	19,3	21,2	5,8	5,0	118,6
3.Алмазно-расточной 2706	119,5	1,0	1,2	18,5	13,0	8,5	0,3	2,4	164,4
4.Круглошлифовальный 312М	108,5	2,6	1,3	8,8	6,5	5,1	5,4	3,1	141,3
5.Горизонтально-протяжной	93,8	5,3	2,3	28,9	5,1	7,6	1,2	3,4	147,6

Технологическая себестоимость операции C_T равна произведению себестоимости станко-часа $C_{станко.ч}$ на общую трудоемкость операции $T_{шт.к}$

$$C_T = C_{станко.ч} \cdot T_{шт.к} \quad (8.17)$$

Погрешность расчета технологической себестоимости по нормативам достигает 15 – 20% по сравнению с результатами расчета по точным формулам. Однако для большинства случаев точность такого расчета является достаточной, поэтому он может быть рекомендован для широкого практического применения.

Следует заметить, что если затраты на технологическую оснастку и специальное оборудование невелики, то оценка экономической эффективности вариантов по технологической себестоимости и производительности обработки будет достаточно объективной. Но если в одном из рассматриваемых вариантов предусматривается приобретение дорогостоящего специального оборудования или специализированной оснастки, то сопоставление экономичности вариантов только по технологической себестоимости и трудоемкости обработки оказывается недостаточным. Высокопроизводительная оснастка и специальное оборудование, как правило, обеспечивают меньшие затраты на обработку заготовки, поэтому сопоставление вариантов по себестоимости и трудоемкости может оказаться в пользу варианта с большим капитальным вложением.

Для объективной оценки экономичности сравниваемых технологических процессов следует принимать за основу целесообразность дополнительных капитальных затрат, которые определяются с помощью коэффициента экономической эффективности капитальных вложений

$$E = (C_1 - C_2) \cdot (K_2 - K_1), \quad (8.18)$$

где C_1, C_2 – себестоимость годового выпуска заготовок по первому и второму вариантам, руб/год; K_1, K_2 – капитальные затраты, связанные с осуществлением первого и второго вариантов технологического процесса, руб.

Для определения экономической целесообразности введения новой техники в различных отраслях промышленности установлен нормативный коэффициент экономической эффективности E_n , который определяет минимальную величину годовой экономии на себестоимости продукции на 1 рубль дополнительных капитальных затрат. Для машиностроительной промышленности $E_n = 0,2$ руб. в год на 1 рубль капитальных вложений.

Экономическая целесообразность дополнительных капитальных вложений определяется путем сравнения расчетного E с нормативным E_H коэффициентом экономической эффективности

$$E = (C_1 - C_2) \cdot (K_2 - K_1) \geq E_H.$$

При сравнении экономичности различных вариантов следует подсчитывать приведенные затраты

$$Z_{\text{пр}} = C_{\text{заг}} \cdot q + E_H \cdot K, \quad (8.19)$$

где $Z_{\text{пр}}$ – приведенные затраты на осуществление годового выпуска заготовок, руб; $C_{\text{заг}}$ – стоимость изготовления одной заготовки, руб/шт; q – годовой выпуск заготовок, шт.; K – капитальные вложения на осуществление данного варианта технологического процесса, руб.

Из формулы (8.19) следует, что приведенные затраты складываются из себестоимости годового выпуска ($C = C_{\text{заг}} \cdot q$) и нормативной годовой экономии для соответствующей отрасли промышленности при рациональном использовании капитальных вложений ($E_H \cdot K$).

Приведенные затраты $Z_{\text{пр}}$ определяются для каждого сравниваемого варианта. Лучшим признается вариант с минимальными приведенными затратами. Годовой экономический эффект от внедрения разработки определяется разностью приведенных затрат сравниваемых вариантов

$$\mathcal{E}_{\text{год}} = Z_{\text{пр.б}} - Z_{\text{пр}}, \quad (8.20)$$

где $Z_{\text{пр.б}}$ – приведенные затраты базового варианта; $Z_{\text{пр}}$ – приведенные затраты нового варианта.

Г Л А В А 9

ТЕХНОЛОГИЧНОСТЬ КОНСТРУКЦИИ МАШИНЫ

9.1. ОБЩИЕ ПОНЯТИЯ О ТЕХНОЛОГИЧНОСТИ КОНСТРУКЦИИ ИЗДЕЛИЯ

Критерием оценки технологичности конструкции изделия является ее экономическая целесообразность при заданном качестве и принятых условиях производства. При таком подходе к оценке конструкции необходимо рассматривать весь комплекс требований к изделию в целом, чтобы, например, незначительная экономия средств при изготовлении не привела впоследствии к резкому увеличению затрат на техническое обслуживание и ремонт.

Оценку технологичности конструкции изделия по сравнению с изделием лучшего отечественного или зарубежного образца производят, сопоставляя их трудоемкость, себестоимость и материалоемкость. Дополнительно определяют степень унификации марок материала, унификацию и нормализацию элементов изделия, рациональное расчленение его на конструктивные и технологические элементы. Определяют конструктивную преемственность оригинальных деталей, коэффициенты среднего класса точности и шероховатости поверхностей деталей изделия, возможности сокращения сроков подготовки и освоения производства изделия, а также возможность автоматизации его изготовления.

Технологичность конструкции изделия – понятие относительное. Для различных типов производства технологичность конструкции одной и той же машины может быть различна. Технологичность конструкции одного и того же изделия будет разной для заводов с различными производственными возможностями. Изделие, достаточно технологичное в единичном производстве, может быть совершенно нетехнологичным в поточно-автоматизированном производстве.

Понятие технологичности конструкции машины распространяется не только на область производства, но и на область ее эксплуатации. Конструкция машины должна быть ремонтно-пригодной и удобной для обслуживания. Последнее важно, поскольку затраты на все виды ремонта часто превышают в несколько раз себестоимость изготовления новых изделий. Повышение ремонтпригодности изделия обеспечивается легкостью и удобством его разборки и сборки, осуществлением ремонта элементов изделия, введением в конструкцию сменных изношенных деталей, а также возможностью восстановления наиболее сложных деталей.

Конструкция изделия должна отрабатываться на технологичность в процессе создания самой конструкции при творческом содружестве конструкторов и технологов. Отработка конструкции на технологичность начинается на стадии разработки технического задания и технического предложения на проектирование нового изделия. Эта работа продолжается и углубляется на стадии разработки эскизного и технического проектов и составления технической документации. На стадии разработки технического предложения анализируются варианты принципиальных схем и компоновок изделия. На стадии эскизного проекта выявляют номенклатуру и параметры деталей, выявляют возможность их унификации и стандартизации, анализируют условия сборки основных деталей, точность их изготовления. На стадии технического проекта выполняют работы по обеспечению технологичности основных сложных деталей, а на стадии разработки рабочей документации производят оценку технологичности конструкции на соответствие основным требованиям, предъявляемым к сборке изделия.

9.2. ТРЕБОВАНИЯ К КОНСТРУКЦИЯМ ДЕТАЛЕЙ И ЗАГОТОВОК

Конфигурация деталей должна быть простой, обеспечивающей возможность применения высокопроизводительных методов обработки и должна иметь надежную установочную базу для обработки. Заданная точность и шероховатость поверхностей детали должны быть обоснованы ее служебным назначением. Необоснованно завышенные требования к точности и шероховатости вынуждают вводить дополнительные операции, удлиняют цикл обработки, увеличивают трудоемкость обработки и повышают себестоимость детали.

Стандартизация и унификация деталей и их элементов способствуют уменьшению трудоемкости процессов производства и снижению себестоимости деталей за счет увеличения серийного выпуска и унификации станочных приспособлений.

При ковке желательно, чтобы заготовки имели простую симметричную форму. Следует избегать пересечений цилиндрических элементов между собой. Детали, конфигурация которых не поддается упрощению, целесообразно заменить сварными изделиями, состоящими из простых элементов. Геометрическая форма заготовок должна обеспечивать возможность их свободного извлечения из штампа. Боковые поверхности заготовки должны иметь штамповочные уклоны. В зависимости от отношения высоты стенки к ее ширине, штамповочные уклоны принимают $5 - 15^\circ$ для наружных и $7 - 15^\circ$ для внутренних стенок при отсутствии выталкивателей. При наличии выталкивателей, эти уклоны равны $2 - 10^\circ$ и $3 - 12^\circ$ соответственно. Переходы от одной поверхности к другой должны осуществляться с закруглениями. Радиусы закруглений принимаются $1,5 - 12,5$ мм для наружных поверхностей и $4 - 45$ мм для внутренних. Конструкция заготовок должна допускать разъем штампов на горизонтальной плоскости.

При конструировании отливок следует упрощать их конфигурацию. Ответственные поверхности заготовок должны занимать в форме нижнее положение, так как на верхних поверхностях могут возникнуть газовые раковины. Необходимо обеспечить по возможности равномерное охлаждение отливки и ее свободную усадку. В местах перехода от толстой стенки к тонкой предусматривают линейные стягивающие ребра. Их толщина составляет $0,5 - 0,6$ толщины тонкой стенки. При литье в кокиль, толщины стенок зависят от материала: для силумина – 3 мм, для стали – $8 - 10$ мм, для серого неотбеленного чугуна – 15 мм. Толщину внутренних стенок рекомендуется брать $0,6 - 0,7$ толщины наружных стенок. При литье по выплавляемым моделям можно получить заготовки с минимальной толщиной стенок $1,5 - 2,0$ мм и минимальным радиусом перехода $1,0 - 3,0$ мм.

Требования к механической обработке можно сформулировать следующим образом:

1. Для сокращения объема механической обработки необходимо повышать точность выполнения заготовок.

2. При выборе материала заготовки необходимо учитывать его обрабатываемость.

3. Заготовки должны иметь удобную и надежную базу для их установки и закрепления на станке.

4. Для увеличения режимов резания необходимо повышать жесткость заготовок.

5. Простановка размеров на чертежах заготовок и детали должна обеспечивать принцип совмещения баз: конструкторской, установочной и измерительной.

6. В ряде случаев выгодно сложные детали разделять на более простые. Например, сборный вариант крупногабаритной шестерни (рис. 9.1, а) позволяет выполнить фланец из более дешевого материала, чем зубчатый венец. Кроме того, упрощается ремонт, нарезание зубчатого венца и создаются условия для осуществления процессов зубошлифования и зубохонингования.

7. Отверстия должны быть увязаны с конструкцией детали и инструмента. Ось отверстия должна располагаться от вертикальной стенки на расстоянии (рис. 9.1, б)

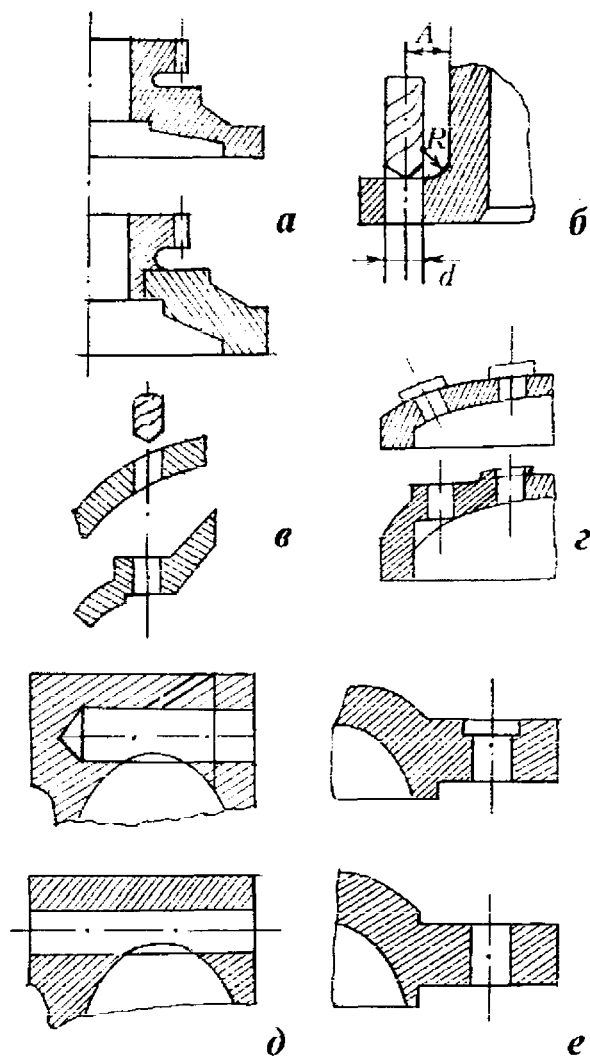


Рис. 9.1. Схемы обработки

$$A \geq \frac{d}{2} + R,$$

а отверстие под соединительные болты на расстоянии

$$A_1 \geq \frac{d_c}{2} + R,$$

где d – диаметр отверстия; d_c – диаметр описанной окружности гайки; R – радиус переходной поверхности.

Размеры отверстий должны быть унифицированы с целью применения многошпindelных головок. Во избежание поломок сверл при сверлении поверхности на входе и выходе инструменты должны быть перпендикулярны оси отверстия (рис. 9.1, в). У дна точных глухих отверстий необходимо предусматривать канавку для выхода инструмента.

Надо избегать отверстий с непараллельными осями (рис. 9.1, з), а также глухих отверстий с перекрещивающимися осями (рис. 9.1, д). В последнем случае предпочтительнее сквозное отверстие с заглушкой. Цековку отверстий лучше заменить точением (рис. 9.1, е).

Перед термической обработкой на деталях не должно быть отверстий, прорезей, канавок, так как они являются концентраторами напряжений, вызывающих при нагреве и охлаждении появление трещин. Резьбовые поверхности, подвергнутые химико-термической обработке, рекомендуется не каливать, так как они получают повышенную твердость и хрупкими.

9.3. РАСЧЕТ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ТЕХНОЛОГИЧНОСТИ ИЗДЕЛИЙ

Показателями технологичности изделий являются: относительная трудоемкость, технологическая себестоимость, удельная материалоемкость и ряд коэффициентов, учитывающих применение типовых технологических процессов, точность изготовления деталей, шероховатость поверхности и возможность взаимозаменяемости узлов и деталей. Технологичность и себестоимость изготовления изделий зависит не только от конструкции, но и в значительной степени от технологического процесса.

Если принять уровень технологичности конструкции двух конструктивных вариантов изделий через K_1 и K_2 , а трудоемкость их изготовления при одинаковых производственных условиях и одинаковом количестве выпускаемых изделий через T_1 и T_2 , то получим

$$\frac{K_1}{K_2} = \frac{T_1}{T_2} \text{ или } K_1 = mK_2,$$

где $m = T_1/T_2$ – коэффициент, характеризующий степень технологичности первого конструктивного варианта изделия.

Уровень технологичности конструкции по технологической себестоимости $K_{ус}$ определяется как отношение достигнутой себестоимости изделия C_T к базовому показателю технологической себестоимости изделия $C_{б.т.}$

$$K_{ус} = \frac{C_T}{C_{б.т.}}$$

При оценке технологичности конструкции изделия и его деталей и сборочных единиц учитывают: количество обрабатываемых поверхностей, количество наименований материалов, оптимальные формы детали, обеспечивающие изготовление с наименьшими припусками, стандартизацию и унификацию деталей и сборочных единиц, а также виды отдельных конструктивных элементов (резьб, модулей зубчатых колес, радиусов и т. д.).

Оптимальная конструктивная форма детали, обрабатываемая с наименьшей трудоемкостью, должна отвечать следующим основным условиям: иметь правильную геометрическую форму, обеспечивающую возможность ее полной обработки от одной установочной базы, обеспечивать возможность обработки поверхностей и отверстий на проход, иметь минимальное количество отверстий и резьб.

Масса изделий связана с запасом прочности и с применением высокопрочных материалов. Уменьшение массы изделия снижает трудоемкость его изготовления. Между массой изделия и трудоемкостью изготовления существует определенная зависимость. Кроме того, минимальная масса изделий, например, вагонов, тракторов, автомобилей и других транспортных средств обеспечивает минимальный расход энергии на их передвижение. Многообразие материалов усложняет процесс производства и прежде всего усложняются заготовительные операции. Увеличиваются затраты на механическую обработку, так как разные марки материалов требуют применения инструментов с различными углами заточки.

Технологичность конструкции по признаку унификации изделия оценивается коэффициентом K_y по формуле

$$K_y = E_y + D_y(E + D),$$

где E_y – число унифицированных сборочных единиц в изделии; D_y – число унифицированных деталей, являющихся составными частями изделия и не вошедших в E_y ; E – количество сборочных единиц в изделии; D – количество деталей, являющихся составными частями изделия.

Коэффициент унификации конструктивных элементов определяется по формуле

$$K_{yэ} = \frac{Q_{yэ}}{Q_э},$$

где $Q_{yэ}$ – число унифицированных типоразмеров конструктивных элементов; $Q_э$ – общее число типоразмеров конструктивных элементов в изделии.

Технологичность конструкции детали во многом зависит от правильности простановки размеров и назначения допусков. Они определяют выбор метода обработки и средств измерения. Размеры должны обеспечивать простоту их измерения без пересчета. При простановке размеров не должно быть замкнутых размерных цепей с допусками. При обработке деталей на станках с ЧПУ простановку размеров следует производить с учетом особенностей системы программного управления. При импульсной системе измерения все размеры отсчитываются от «нулевой точки», являющейся началом координат. Здесь размеры не связаны между собой, поэтому должны быть проставлены координатным методом от одной базы.

При импульсной системе отсчета размеры должны проставляться цепочкой, один за другим, так как показания импульсного счетчика после отсчета отрезка пути, пройденного инструментом, сбрасываются на нуль и, при подаче новой команды, производится новый счет импульсов, пропорциональный заданному отрезку пути инструмента.

При назначении норм точности на отдельные размеры и шероховатость поверхности, следует учитывать конкретные производственные условия и не допускать необоснованно завышенных допусков и классов шероховатости поверхности. Для расширения среднего допуска на составляющие звенья размерной цепи в ряде случаев применяют вероятностный метод расчета размерных цепей.

Рассмотрим два варианта расчета размерной цепи – методом полной взаимозаменяемости и методом неполной взаимозаменяемости.

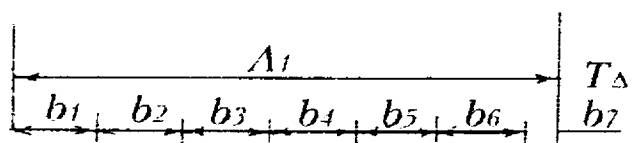


Рис. 9.2. Размерная цепь

Для примера рассмотрим узел, состоящий из шести звеньев $b_1, b_2, b_3, b_4, b_5, b_6$, и замыкающего звена b_7 , с допуском $T_{\Delta}=0,06$. Схема размерной цепи приведена на рис.9.2. При пол-

ной взаимозаменяемости средний допуск на каждое звено определяется

$$T_{\text{ср}} = \frac{T_{\Delta}}{m-1},$$

где m – число звеньев размерной цепи.

В нашем случае число звеньев равно $m=7$. Следовательно, средний допуск на составляющие звенья будет равен

$$T_{\text{ср}} = \frac{0,06}{7-1} = 0,01 \text{ мм.}$$

При неполной взаимозаменяемости средний допуск на звено определяется из выражения

$$T_{\text{ср}} = \frac{T_{\Delta}}{t\sqrt{\lambda(m-1)}},$$

где t – коэффициент, зависящий от процента риска; λ – коэффициент, учитывающий распределение размеров.

В табл. 9.1 приведены значения t .

Т а б л и ц а 9.1

% риска	t	% риска	t
0,27	3,00	4	2,05
0,6	2,70	6	1,88
1,00	2,57	10	1,05
2,00	2,31	33	1,00

Коэффициент λ зависит от закона распределения размеров. Он изменяется от $\frac{1}{5}$ до $\frac{1}{8}$.

Для нормального закона распределения $\lambda = \frac{1}{6}$, $t = 3$.

$$T_{\text{ср}} = \frac{T_{\Delta}}{t \sqrt{\lambda(m-1)}} = \frac{0,06}{3 \cdot \sqrt{\frac{1}{6}(7-1)}} = 0,02 \text{ мм.}$$

Как видно, при незначительном риске удастся заметно расширить среднее значение допусков составляющих звеньев.

Г Л А В А 10

МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

10.1. ОБРАБОТКА НАРУЖНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТЕЛ ВРАЩЕНИЯ

Предварительная обработка валов. Валы изготавливаются из проката, поковок, штампованных заготовок и отливок. По форме валы различаются: гладкие, ступенчатые, эксцентричные, коленчатые. По размерам – мелкие (длиной 150 – 200 мм), средние (длиной до 1000 мм), крупные (длиной более 1000 мм). Перед механической обработкой валы подвергаются правке на специальных правильных станках и разрезке.

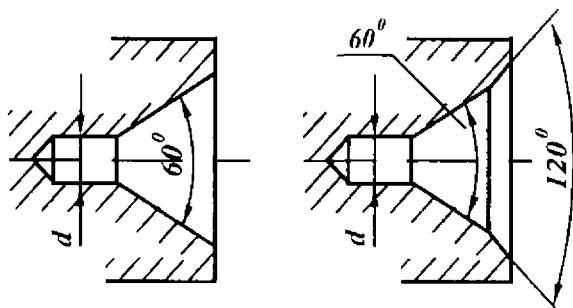


Рис. 10.1. Центровые отверстия

Технологическими базами подавляющего большинства валов являются центровые отверстия. В связи с этим механическую обработку валов начинают с операции подготовки технологических баз – подрезки торцов и их зацентровки. Центровые отверстия должны иметь доста-

точные размеры, угол их конусности должен точно совпадать с углом конусности центров станка. Противоположные центровые отверстия должны находиться на одной оси. На практике чаще используются центровые отверстия заготовок с углом 60° . Иногда при обработке крупных тяжелых заготовок угол конусности увеличивают до $75 - 90^\circ$. Вершина центра не должна упираться в заготовку, поэтому центровые отверстия имеют цилиндрическую часть малого диаметра d (рис. 10.1). С целью предохранения центрального отверстия от случай-

ного его повреждения с торца вала предусматривается специальная фаска под углом 120° .

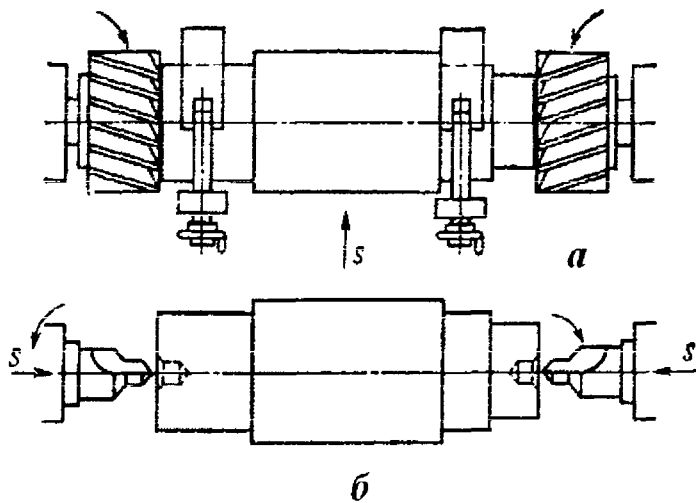


Рис. 10.2. Схема обработки на фрезерно-центровальном станке

в которой производится зацентровка комбинированными центровочными сверлами. Заготовка базируется в самоцентрирующихся призмах, продольное перемещение ограничивается упором.

Точение. Детали, имеющие форму тел вращения, можно разделить на валы, втулки и диски.

Точение производится на токарно-винторезных, гидрокопировальных, токарно-револьверных, многолезцовых, токарно-карусельных, одношпиндельных и многошпиндельных токарных полуавтоматах и автоматах.

Заготовки устанавливают в центрах станка или в патронах различных типов: трехкулачковых, самоцентрирующих, цанговых и др.

Черновую обработку ступенчатых валов выполняют по разным вариантам (рис. 10.3). Схема обработки с наименьшим временем об-

Зацентровку производят на вертикально-сверлильных, горизонтально-расточных, токарных и револьверных станках, а в серийном и массовом производствах – на специальных фрезерно-центровальных станках (рис. 10.2).

Торцевые поверхности валов сначала фрезеруют, а после окончания операции заготовка перемещается во вторую пози-

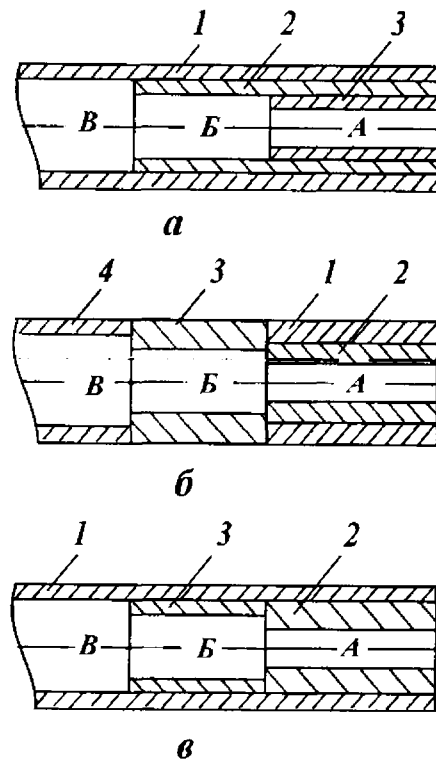


Рис. 10.3. Схемы обтачивания ступенчатого вала: 1 – 4 номера переходов; А, Б, В – ступени вала

работки считается наиболее предпочтительной. При удалении припуска исходят из соображений наименьшего ослабления жесткости вала, т. е. ступени меньшего диаметра обрабатываются последними.

При черновом точении точность обработки достигается 14-го качества и шероховатость $Rz = 40$ мкм. Чистовое точение обеспечивает точность обработки 7 – 8-го качества и шероховатость поверхности $Ra = 1,25$ мкм. При обработке длинных, маложестких валов применяют неподвижные и подвижные люнеты. Люнеты служат дополнительной опорой, воспринимающей нагрузки. Подвижный люнет, следуя за резцом, воспринимает силу резания. Обрабатываемая поверхность опирается на кулачки люнета. В тех случаях, когда следует обеспечить соосность обтачиваемой поверхности с ранее обработанной, кулачки люнета устанавливаются впереди резца, т. е. на ранее обточенную поверхность. При скоростном резании кулачки создают значительное трение.

Для уменьшения трения применяют люнеты с роликовыми опорами (рис. 10.4, а). При скоростном резании часто возникают вибрации, оказывающие большое влияние на шероховатость поверхности и точность обработки. Для устранения вибрации применяются люнеты с виброгасителем (рис. 10.4, б). Тарельчатые пружины, помещенные в корпусе виброгасителя, поглощают вибрации резца.

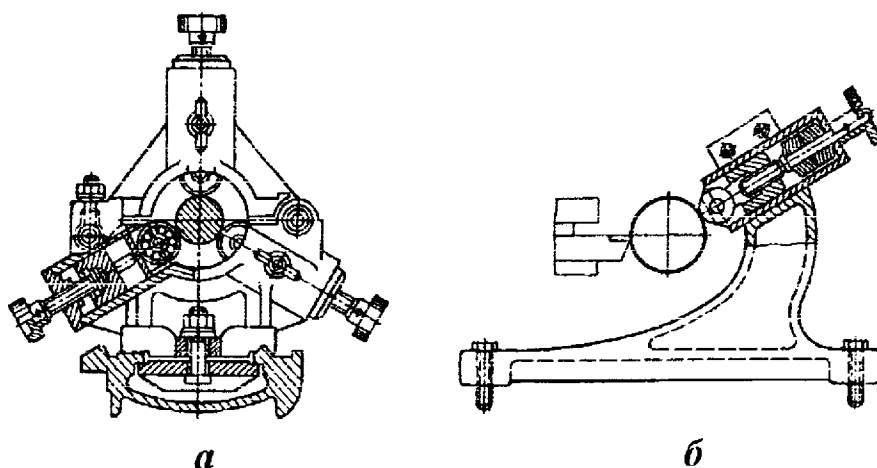


Рис. 10.4. Люнет с роликовыми опорами (а); подвижный люнет виброгаситель (б)

При высоких скоростях резания стружка, имея сливную форму, сходит из-под резца непрерывной лентой. Такую стружку нельзя обрывать или удалять руками – она может сильно порезать или вызвать

ожог. Для размельчения стружки применяют специальные устройства – стружколоматели.

В массовом и крупносерийном производствах обработка валов производится на многолезцовых станках, которые имеют два суппорта – передний и задний. Передний суппорт, имеющий продольное движение, служит для точения. Задний суппорт, совершающий поперечное движение, предназначен для подрезки торцов, прорезания канавок. Резцы настраиваются так, чтобы обработка всех участков заканчивалась одновременно.

Многолезцовое обтачивание выполняется тремя различными способами.

При обработке по первому способу суппорт совершает путь L , равный сумме обрабатываемых ступеней $L = (l_1 + l_2 + l_3)$ (рис.10,5,а). Этот способ обработки называется способом деления общего припуска. Здесь припуск на одной из ступеней снимается последовательно несколькими резцами.

Второй способ называется способом деления длины заготовки на несколько участков (рис. 10.5, б). Этот способ применяется в тех случаях, когда максимальный припуск может быть удален резцами за один проход. При данной схеме обработки длина хода резца равна

$$l = \frac{L}{n}.$$

Третий способ называется способом деления максимальной ступени вала (рис. 10.5, в). Более длинная ступень l_1 протачивается несколькими резцами.

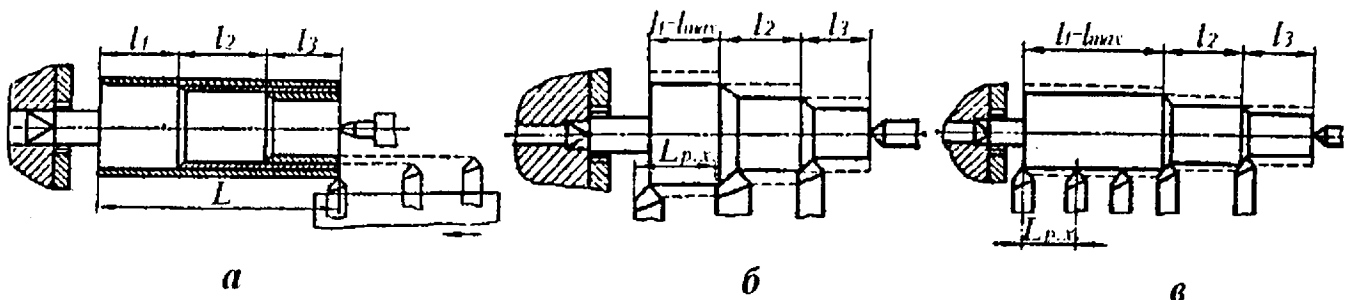


Рис. 10.5. Способы обработки ступенчатого вала на многолезцовом станке: а) способ деления припуска; б) способ деления длины обработки вала; в) способ деления длины максимальной ступени

Установка резцов производится либо по обработанной заготовке, либо по специальному эталону.

Многорезцовая обработка применяется на предварительных операциях. Чистовое обтачивание производится на гидрокопировальных станках 1708, 1Н713, 1Б732 и др., имеющих два суппорта, расположенных в вертикальной плоскости. При данной схеме обработки облегчается сход стружки из зоны резания. Обточка по копиру осуществляется резцом, расположенным в верхнем суппорте. Подрезка торцов осуществляется резцами, расположенными в нижнем суппорте. На многорезцовых станках обточка осуществляется со скоростью 30 – 50 м/мин, а на гидрокопировальном – 150 – 200 м/мин.

В единичном и мелкосерийном производствах валы обрабатывают на станках с программным управлением.

Отделочная обработка. К отделочным методам обработки относят тонкое (алмазное) точение, шлифование, притирку, суперфиниш, полирование, алмазное выглаживание и обкатку роликами и шариками.

При тонком алмазном точении достигается шероховатость поверхности $Ra = 0,3 \div 1,25$ мкм. Обработка производится на режимах: подача $S = 0,02 \div 0,05$ мм / об, глубина резания $t = 0,05 \div 0,15$ мм, скорость резания $V = 300 \div 3000$ м / мин. В качестве режущего инструмента для тонкого точения сталей применяют резцы, оснащенные пластинками из твердого сплава Т30К4, а для обработки чугунов – пластинки из твердого сплава ВК2, ВК3. Высокопрочные стали обрабатываются резцами, оснащенными режущими элементами из эльбора. Для обработки валов из цветных сплавов применяют алмазные резцы, которые благодаря высокой твердости и незначительному износу обеспечивают более высокое качество поверхностей и точность размеров.

Шлифование. Шлифование является основным и наиболее распространенным методом обработки наружных цилиндрических поверхностей. Тонкое шлифование осуществляется мягкими мелкозернистыми абразивными инструментами на круглошлифовальных (рис. 10.6), бесцентровошлифовальных (рис. 10.7) и ленточношлифовальных станках.

На круглошлифовальных станках заготовка устанавливается в центрах станка. Скорость вращения заготовки изменяется от 10 до 15 м/мин, скорость круга 30 м/с.

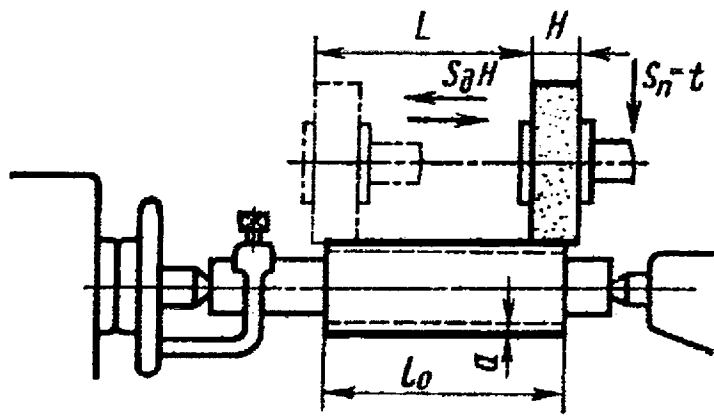


Рис. 10.6. Схема круглого шлифования с продольной подачей

Процесс шлифования осуществляется с продольной подачей (рис. 10.6) и методом врезания (рис. 10.8). В первом случае заготовка совершает возвратно-поступательное продольное перемещение, а в конце каждого хода производится поперечная подача.

Продольная подача равна $S_{\text{пр}} = (0,5 \div 0,8)H$ от высоты круга за один оборот заготовки

При выхаживающих окончательных проходах продольная подача уменьшается до $S_{\text{пр}} = (0,2 \div 0,3)H$ и глубина резания до $0,005 \div 0,02$ мм за каждый ход. Длина продольного хода при шлифовании на проход $l = l_0 - (0,2 \div 0,4)H$ мм.

Второй способ заключается в том, что шлифовальному кругу сообщается только поперечная подача. При шлифовании на бесцентрово-шлифовальных станках (рис. 10.7) заготовка 2 устанавливается между двумя кругами 1 и 3 на специальный поддерживающий нож 4, изготовленный из износостойкого материала. Благодаря скосу, направленному в сторону ведущего круга, деталь прижимается к нему, что способствует передаче крутящегося момента ведущим кругом детали

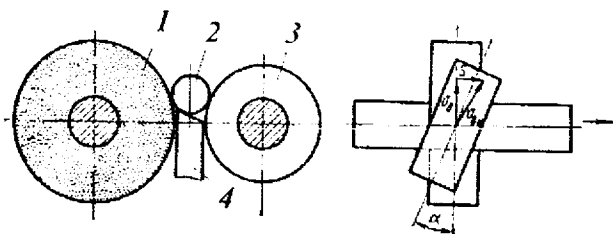


Рис. 10.7. Схема бесцентрового шлифования

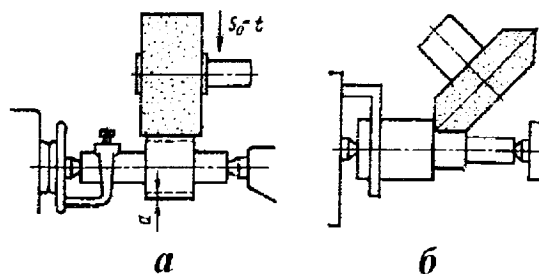


Рис. 10.8. Схема круглого шлифования с поперечной подачей (а); схема шлифования шейки и уступа вала (б)

Во избежание огранки центр детали смещается на 10 – 15 мм от линии центров шлифовальных кругов. Бесцентровое шлифование

может осуществляться методом врезания до упора и шлифованием на проход. При шлифовании на проход ведущий круг 3 устанавливают под углом $\alpha = 1 \div 5^\circ$.

Продольная подача определяется по формуле

$$S = 1000 \cdot V_{\text{вк}} \sin \alpha \cdot \eta_S,$$

а окружная скорость вращения детали $V_{\text{д}} = V_{\text{вк}} \cos \alpha (1 + \delta)$,

где S – продольная подача, мм/мин; $V_{\text{д}}$ – окружная скорость вращения детали, м/мин; $V_{\text{вк}}$ – окружная скорость ведущего круга, м/мин; η_S – коэффициент осевого проскальзывания, который равен $0.90 - 0.98$; δ – коэффициент, учитывающий ускоренное вращение изделия за счет скорости шлифующего круга ($\delta = 0,04 \div 0,07$).

Величина скорости продольной подачи S при шлифовании на проход изменяется в пределах $400 - 4000$ мм/мин. Скорость ведущего круга $V_{\text{вк}} = 15 \div 30$ м/мин при черновом шлифовании, а при чистовом шлифовании возрастает до 100 м/мин и выше.

Возможно шлифование набором кругов разной зернистости, ширина такого набранного круга достигает 800 мм. Шлифование таким набранным кругом за один проход обеспечивает обработку по 7–8-му качеству точности и шероховатость поверхности $Ra = 0,32 \div 0,16$ мкм. Бесцентровошлифовальные станки имеют жесткость в $1,5 - 2$ раза большую по сравнению с круглошлифовальными станками. Поэтому они допускают более форсированные режимы, имея более высокую производительность. Они позволяют осуществлять шлифование валов, имеющих малую жесткость.

Хонингование. Хонингование валов производится на специальных станках, снабженных приспособлением с двумя полукольцами (рис.10.9) На внутренней стороне полуколец закреплены шлифовальные бруски.

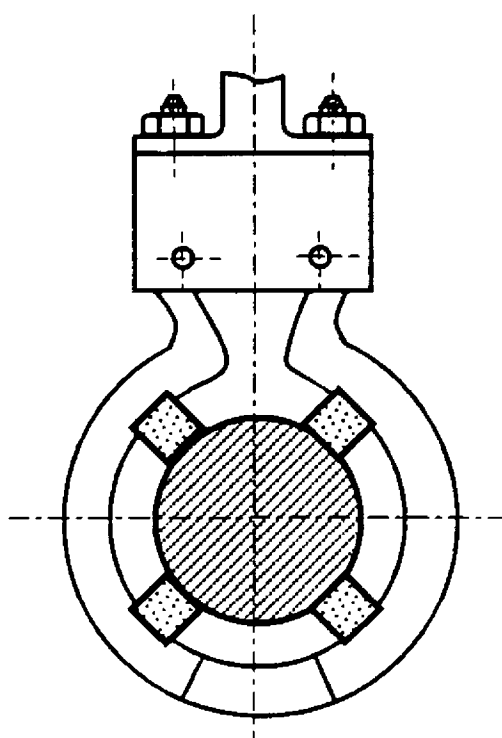


Рис. 10.9. Схема хонингования цилиндрической поверхности

Обрабатываемая деталь, охватываемая двумя полукольцами, получает вращательное и поступательное движение. Скорость резания при хонинговании колеблется от 60 до 200 м/мин, а давление абразивных брусков – от 0,3 до 1,35 МПа. После двух – трех минут хонингования станок автоматически отключается и деталь освобождается.

Суперфиниш. Суперфиниш похож на хонингование, так как здесь в качестве обрабатывающего инструмента также применяют мелкозернистые абразивные бруски.

Отличие суперфиниша от хонингования заключается в том, что при суперфинише наряду с вращательным и поступательным продольным движениями заготовки имеется еще колебательное, которое здесь считается главным рабочим движением (рис. 10.10).

Колебательное движение направлено вдоль брусков, имеет ход

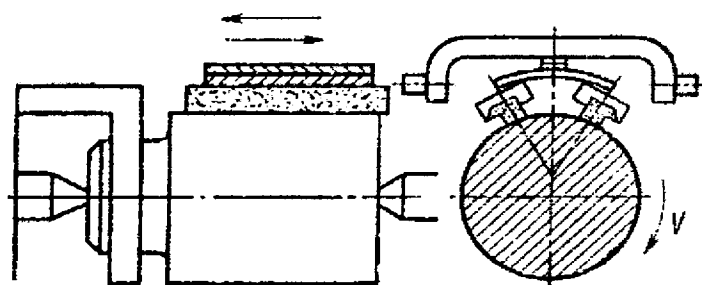


Рис. 10.10. Схема суперфиниширования

2–6 мм и частоту колебаний 1000 ход/мин. При суперфинишировании толщина срезаемого слоя изменяется от 0,005 до 0,02 мм, продолжительность обработки 0,2 – 0,5 мин. Шероховатость поверхности достигается до $Rz = 0,04$ мкм.

В качестве смазывающей

жидкости используют смесь масла с керосином в соотношении 1:10. В начале процесса микронеровности на поверхности разрывают масляную пленку. Выступающие гребешки микронеровностей срезаются абразивными брусками. По мере срезания гребешков микронеровность сглаживается и после того, как масляная пленка станет сплошной и не будет иметь разрывов от выступающих зерен, процесс резания прекращается.

При суперфинишировании предъявляется очень жесткое требование к чистоте смазывающей жидкости, ибо наличие мельчайших металлических или абразивных частичек может вызвать появление рисок на поверхности. Суперфинишу предшествует операция шлифования или такого точения, которое обеспечивает высоту шероховатости поверхности не более $Ra = 0,32$ мкм. Суперфиниш не исправляет дефекты формы и размеров, полученные от предыдущих операций.

Притирка. Притирка – отделочная операция, которая выполняется инструментами-притирами.

Притиры изготавливают из чугуна или бронзы и на их поверхность наносится абразивная суспензия (микropорошок с машинным маслом). Относительное перемещение детали и притира должно обеспечивать движение зерен по новым, не повторяющимся траекториям. Для обеспечения этого условия обрабатываемая деталь получает вращение от шпинделя станка, а возвратно-поступательное продольное перемещение осуществляется вручную. В качестве абразивов применяют окись хрома (Cr_2O_3), окись железа (Fe_2O_3) или крокус и венскую известь. По твердости, режущим свойствам и производительности окись хрома стоит на первом месте. Наиболее чистую поверхность обеспечивает венская известь (углекислый кальций с примесью магния и железа). В качестве смазывающего материала используют смесь машинного масла с керосином. При использовании венской извести применяют спирт, а при использовании крокуса – вазелин. Для доводочных работ широко используются пасты ГОИ (по имени автора – Государственного оптического института). Пасты ГОИ содержат термически обработанную (прокаленную) окись хрома, жиры и органические поверхностно-активные кислоты (олеиновую или стеариновую). Пасты ГОИ делятся на грубые (40 мкм), средние (16 мкм) и тонкие (7 мкм). Цифры указывают толщину снятого слоя со стальной закаленной плитки при 100 возвратно-поступательных движениях притира. Притирка наружных цилиндрических поверхностей осуществляется на токарных станках с использованием специальных приспособлений. Скорость притирки 15 – 40 м/мин. Притирка обеспечивает точность деталей до 5-го качества с шероховатостью поверхности $Rz = 0,32 \div 0,05$ мкм. Припуск для предварительной притирки равен 0,010 – 0,015 мм, а для окончательной – 0,005 мм.

10.2. МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ ОТВЕРСТИЙ

10.2.1. Виды отверстий и методы их обработки

В деталях машин отверстия бывают цилиндрические, ступенчатые, конические, фасонные. Отверстия могут быть открытыми с двух сторон или с одной стороны (глухие). Их обрабатывают лезвийными

и абразивными инструментами и физико-химическими методами. Лезвийным инструментом отверстия можно сверлить, зенкеровать, развертывать, растачивать, протягивать. Абразивным инструментом – шлифовать, хонинговать, полировать, притирать.

При обработке отверстий в труднообрабатываемых материалах (твердые сплавы, стекло, керамика и др.), а также при получении отверстий малых диаметров применяют следующие физико-химические методы обработки: ультразвуковой, светолучевой, электронно-лучевой, электроэрозионный, электрохимический.

Обработка отверстий без снятия стружки производится путем поверхностно-пластического деформирования с применением операций: алмазное выглаживание, раскатка шариками или роликами, прошивка дорном или калиброванными шариками. Отверстия в деталях из листового материала чаще всего пробивают в вырубных штампах.

10.2.2. Обработка отверстий лезвийным инструментом

Сверление – распространенный способ обработки глухих и сквозных отверстий в сплошном материале с точностью 12–13-го качества и шероховатостью $Rz = 10 \div 30$ мкм (ГОСТ 2789 – 73).

Отверстия диаметром больше 30 мм сверлят за два перехода, сначала сверлом меньшего размера, затем – требуемого диаметра.

Различают два метода сверления: с вращающимся сверлом (по этому принципу работают сверлильные и расточные станки) и с вращением детали (токарно-револьверные станки). Для уменьшения увода сверла производят предварительное засверливание (центрование) коротким жестким сверлом.

Центрование производят на токарно-револьверных станках и автоматах, а также на сверлильных и расточных станках с направляющими втулками. Требуемая точность взаимного расположения отверстий обеспечивается с помощью кондукторов. Если заданная точность отверстий выше 9-го качества, то в зависимости от его диаметра и вида заготовки последующая обработка осуществляется зенкерованием, растачиванием, развертыванием. Точность взаимного расположения отверстий при последовательной обработке разными инструментами осуществляется также с помощью кондуктора, но со сменными втулками и быстросменными патронами для закрепления инструментов в шпиндель станка.

Зенкерование применяют для обработки предварительно полученного отверстия литьем, прошивкой или сверлением.

Для обработки фасок в отверстиях цилиндрических и торцевых поверхностей под головки заклепок, винтов, болтов и гаек применяют зенкеры (рис. 10.11). Зенкеры, в зависимости от их назначения, подразделяются на спиральные, цилиндрические, конические. Спиральные зенкеры применяют

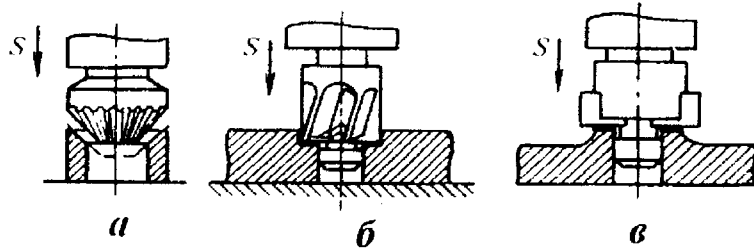


Рис. 10.11. Зенковка (а), цековка (б, в)

для обработки сквозных цилиндрических отверстий. Зенкеры диаметром 12 – 35 мм изготавливают цельными с коническим хвостовиком и с тремя режущими зубьями, а диаметром 25 – 30 мм – насадными с четырьмя или шестью режущими зубьями. Насадные зенкеры диаметром 60 – 175 мм выполняют со стальными рифлеными ножами с пластинками из твердых сплавов.

Для обеспечения заданной точности и устранения увода оси инструмента применяют кондукторы. Различают три способа ориентации зенкера: верхнее, нижнее и двойное (рис. 10.12).

Для обеспечения заданной точности и устранения увода оси инструмента применяют кондукторы. Различают три способа ориентации зенкера: верхнее, нижнее и двойное (рис. 10.12).

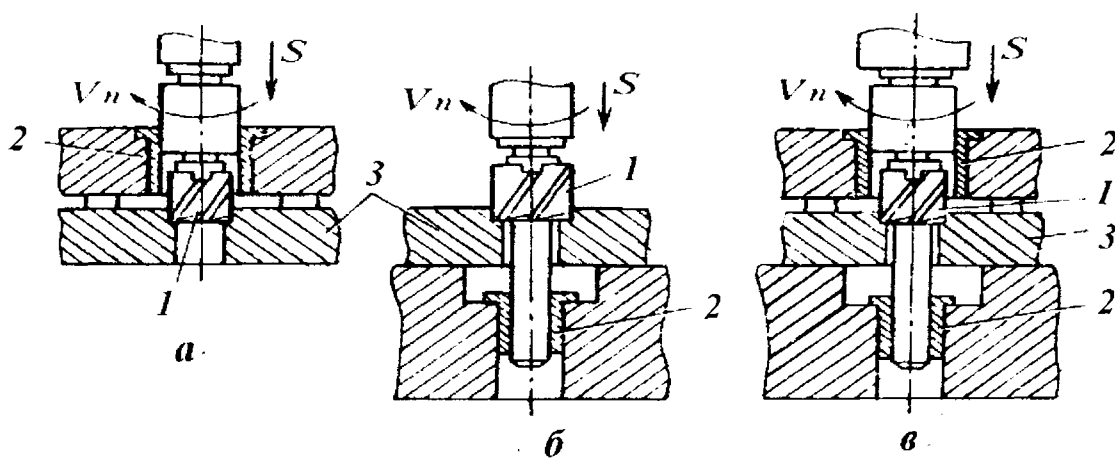


Рис. 10.12. Направление зенкера в кондукторных втулках: а – верхнее, б – нижнее, в – двойное

Верхнее направление зенкера 1 во втулке кондуктора 2 обеспечивает его ориентацию специальной цилиндрической направляющей (рис. 10.12, а). Нижнее направление осуществляется втулкой 2, рас-

положенной под деталью (рис.10.12, б). Для обработки отверстий диаметром свыше 25 мм рекомендуется применять двойное направление. Зенкер со шпинделем обычно имеет шарнирное или плавающее соединение. Это исключает влияние погрешностей, связанных с биением шпинделя относительно оси направляющих втулок на положение оси отверстия детали.

Припуск для зенкерования примерно равен 0,1 от диаметра отверстия. Грубое зенкерование отверстий после литья обеспечивает 13-й квалитет точности, а после сверления или черного растачивания 11–12-й квалитет, шероховатость поверхности $Ra = 10 \div 25$ мкм.

Развертывание – основной способ обработки отверстий в материале твердостью $HRC \leq 40$, 6 – 5-й квалитета точности, с шероховатостью $Ra = 2,5 \div 0,15$ мкм.

Инструмент – развертка отличается от зенкера большим числом зубьев и меньшими углами в плане. Необходимым условием достижения высокой точности обработки при развертывании является равномерность снимаемого припуска и строгое совпадение оси развертки с осью обрабатываемого отверстия. Развертка во время работы должна свободно устанавливаться по отверстию или иметь точное направление. Развертка направляется кондукторными втулками с нижним, верхним или двойным направлением. В зависимости от требуемой точности развертывание производится одним или двумя развертками. Отверстие 7-го квалитета точности обрабатывается одной разверткой, а 5-го квалитета точности – двумя развертками.

Растачивание – производится на токарных, расточных, агрегатных и специальных станках.

Растачивание производится при вращении детали (токарные станки) или вращении расточной бортштанги (горизонтальные, вертикальные, координатные, агрегатные и многошпиндельные станки). В серийном производстве отверстия растачивают пластинчатыми резцами, расточными блоками и головками. Расточный блок состоит из корпуса и вставных резцов, установленных на требуемый размер. Блок крепится в расточной бортштанге, имеющей переднее направление.

Расточка отверстий в корпусных деталях производится на координатно-расточных станках с программным управлением 262ПР, оснащенных оптическими системами отсчета по шкалам с точностью $\pm 0,002$ мм.

В ряде случаев бортштанга шарнирно соединяется со шпинделем, базируется на двух опорах.

Растачивание отверстий в стальных деталях производится на режимах: скорость резания 150 – 250 м/мин, продольная подача 0,02 – 0,12 мм/об, глубина резания 0,1 – 0,3 мм. Обработка деталей из цветных сплавов производится на режимах: скорость резания 800 – 1000 м/мин, подача 0,02 – 0,10 мм/об, глубина резания 0,05 – 0,04 мм.

Тонкое растачивание производится на прецизионных расточных одно- или многошпиндельных вертикальных и горизонтальных станках 2А710, 2705, 2706, 2714, 2722, 2А715, 278Л и др. Станки имеют повышенную жесткость и виброустойчивость. На этих станках можно сверлить, растачивать, зенковать, развертывать цилиндрические и конические отверстия, подрезать торцы, нарезать резьбу, протачивать канавки и т. п.

Для обработки отверстий на агрегатных станках используются многолезвийные, комбинированные и сборные инструменты, заранее установленные на требуемый размер. Отверстия диаметром 50 – 200 мм и длиной 75 – 200 мм обрабатываются на вертикальных станках, отверстия меньших диаметров – на горизонтальных. Резцы закрепляются в консольных жестких оправках. Тонкое растачивание обеспечивает точность отверстий 5 – 6-го квалитетов при шероховатости поверхности $Ra = 0,25 \div 0,18$ мкм. Погрешность формы (овальность, конусность) составляет 0,003 – 0,004 мм.

Протягивание – это процесс обработки цилиндрических, шлицевых и квадратных отверстий диаметром от 10 до 300 мм с точностью 5 – 6-го квалитета и шероховатостью $Ra = 0,15 \div 0,08$ мкм.

Длина протягивания отверстия обычно не превышает трехкратной величины его диаметра. Перед протягиванием отверстие обрабатывается сверлением, зенкерованием или растачиванием.

Различают профильное, генераторное и прогрессивное протягивание.

Для профильной схемы резания форма режущих кромок протяжки соответствует профилю обрабатываемой поверхности. Зубья протяжки срезают заданный припуск последовательно. Окончательный размер отверстия обеспечивается калибрующими зубьями.

При генераторной схеме резания форма режущих зубьев протяжки не соответствует профилю обрабатываемого отверстия детали.

Окончательная форма и размеры обрабатываемой поверхности обеспечиваются последними зубьями, работающими по профильной схеме. При прогрессивной схеме резания режущие зубья по периметру разделены на отдельные секции. Зубья протяжки срезают металл отдельными участками контура, но толщиной в 5 – 10 раз больше, чем при работе по профильной схеме.

Отверстия протягивают на горизонтальных и вертикально-протяжных станках при скорости резания 3 – 5 м/мин. При протягивании деталь устанавливается на жесткую или шаровидную опору. На жесткую опору устанавливают детали, у которых обеспечена перпендикулярность торца к оси отверстия при подрезке. Если торец детали не подрезан, например, поверхность после литья, или при обработке не обеспечена перпендикулярность оси отверстия детали к торцу, применяют шаровидную опору.

Припуски под протягивание составляют 0,5–1,5 мм на диаметр. Подача на зуб 0,02 – 0,1 мм. При протягивании применяют сульфидфрезол или 20-и процентный раствор эмульсола в воде с добавлением 4% мыла. Основное время (в мин) при протягивании определяется по формуле

$$t_0 = \frac{L+l}{1000} \left(\frac{1}{V_p} + \frac{1}{V_x} \right), \quad (10.1)$$

где L – длина рабочей части протяжки, в мм; l – длина протягиваемой детали, в мм; V_p – скорость резания (рабочего хода) в м/мин; V_x – скорость обратного хода в м/мин.

Скорость обратного хода принимается в 2–3 раза больше скорости рабочего хода.

10.2.3. Обработка отверстий абразивными инструментами

Шлифование отверстий. Внутреннее шлифование цилиндрических, конических, сквозных и глухих отверстий в деталях, изготовленных из сталей, чугунов, жаропрочных сплавов, обеспечивает точность 5 – 6-го качества и шероховатость поверхности $Ra=1,25 \div 0,15$ мкм.

На шлифовальных станках обработку производят:

- при вращающейся детали, закрепленной в патроне;
- при неподвижной детали на станках с планетарным движением шпинделя;
- при вращающейся незакрепленной детали на бесцентрово-шлифовальных станках.

Наиболее распространен первый способ обработки с продольной или поперечной подачей (рис. 10.13).

Диаметр шлифовального круга обычно принимают равным 0,8 – 0,9 диаметра отверстия.

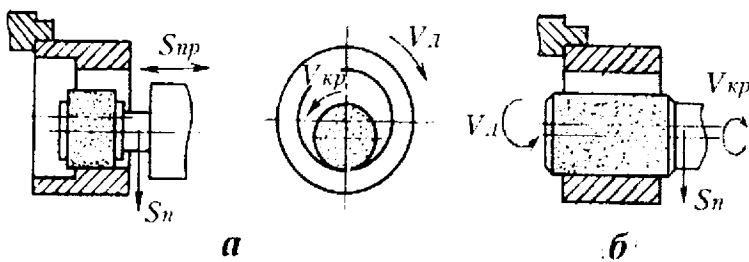


Рис. 10.13. Схема шлифования отверстий:
а – с продольной подачей; б – с поперечной подачей

В зависимости от свойств обрабатываемого материала и вида операции, скорость резания при шлифовании изменяется от 25 до 100 м/с. Продольная подача выражается в долях ширины круга и принимается $S_{пр} = (0,2 \div 0,3)V_k$ мм/об при чистовом шлифовании,

а . при черновом – $S_{пр} = (0,6 \div 0,8)V_k$ мм/об.

Поперечная подача $S_{п}$ круга при чистовом шлифовании равна 0,003 – 0,015 мм/дв. ход стола, а при черновом – 0,05 – 0,075 мм/дв. ход стола. Основное время (в мин) для внутреннего шлифования с продольной подачей круга определяется по формуле

$$t_0 = \frac{a}{n_{дв.х} \cdot S_{п}} \cdot k, \quad (10.2)$$

где a – припуск на сторону в мм; $n_{дв.х}$ – число двойных ходов в минуту $n_{дв.х} = \frac{V_{пр} \cdot 1000}{2L}$; $S_{п}$ – поперечная подача за один двойной ход стола (глубина резания) в мм; k – коэффициент доводки (выхаживания), учитывающий точность шлифования; $V_{пр}$ – скорость продольного хода стола в м/мин.

Величина K зависит от точности изготовления диаметра.

При точности шлифования 0,1...0,15 мм – $k=1,1$.

При точности шлифования 0,07...0,09 мм – $k=1,25$.

При точности шлифования 0,04...0,06 мм – $k=1,4$.

При точности шлифования 0,02...0,03 мм – $k=1,7$.

Длина продольного хода стола определяется по формуле:

а) при шлифовании на проход (в мм)

$$L = l_0 - (0,2...0,4)B_k;$$

б) при шлифовании в упор (в мм)

$$L = l_0 - (0,4...0,6)B_k,$$

где l_0 – длина шлифуемой поверхности в мм; B_k – ширина шлифовального круга в мм.

Основное время при шлифовании с поперечной подачей (метод врезания) определяется по формуле

$$t_0 = \frac{a}{n_d \cdot S_{\Pi}} \cdot k, \quad (10.3)$$

где S_{Π} – поперечная подача на один оборот детали; n_d – частота вращения детали в мин; k – коэффициент доводки.

10.2.4. Шлифование отверстий с планетарным движением шпинделя

На рис. 10.14, а показана схема планетарного шлифования внутреннего отверстия. Шпиндель шлифовального круга I имеет четыре движения: вращение вокруг своей оси 1; планетарное движение по окружности внутренней поверхности детали, неподвижно закрепленной на столе станка II; возвратно-поступательное движение вдоль оси детали III; поперечное перемещение (поперечная подача). Эта схема шлифования применяется для обработки корпусных деталей.

Бесцентровое шлифование отверстий. На рис. 10.14, б показана схема бесцентрового шлифования внутреннего отверстия втулки.

Деталь поддерживается тремя роликами. Ролик 1 является ведущим: он создает вращательное движение детали 2 относительно шлифовального круга 3. Верхний нажимный ролик 5 прижимает деталь к ведущему ролику 1, нижнему поддерживающему опорному ролику 4. Деталь, зажата между тремя роликами, имеет скорость ведущего ролика. При смене деталей зажимный ролик 5 отходит влево, освобождая деталь.

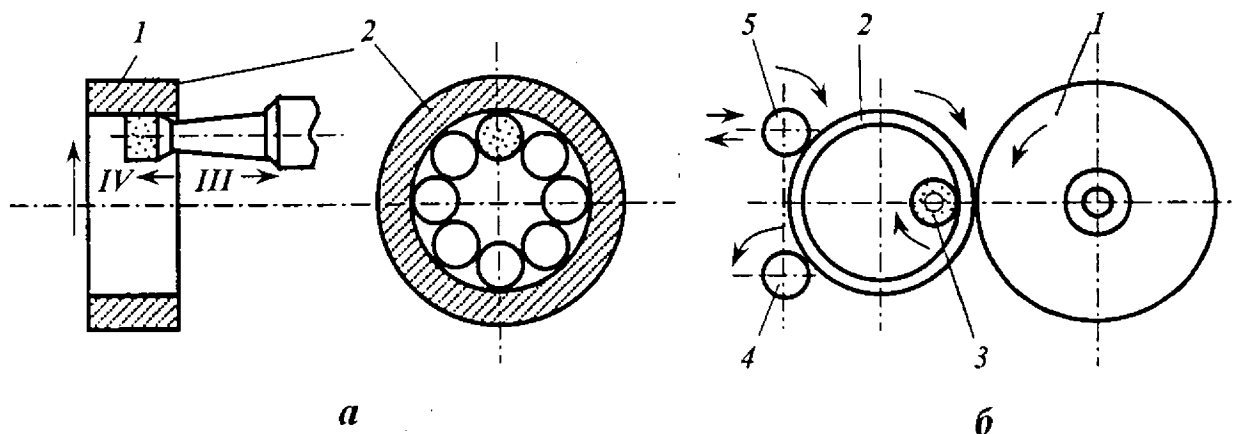


Рис. 10.14. Схемы шлифования отверстий: *а* – планетарное; *б* – бесцентровое

Точность обработки при бесцентровом шлифовании по диаметру соответствует 5 – 6-му качеству, а concentricity and parallelism of axes of the internal and external diameter reaches 0,003 mm.

10.2.5. Хонингование отверстий

Хонингование применяется для обработки предварительно развернутых, расточенных или шлифованных сквозных и глухих цилиндрических отверстий.

Обработка осуществляется хонем – инструментом, имеющим абразивные или алмазные бруски. Головка (хон) совершает одновременно вращательное ($V_{вр} = 30 \div 60$ м/мин) и возвратно-поступательное ($V_{п} = 10 \div 15$ м/мин) движения. Бруски в процессе обработки раздвигаются (радиальная подача). Раздвижение в радиальном направлении брусков осуществляется механическим, гидравлическим или пневматическим устройствами. Давление брусков на поверхность детали 0,2 – 1 МПа.

Хонинговальные бруски изготавливают из электрокорунда, карбида кремния, эльбора, алмаза. Процесс хонингования осуществляется с СОЖ, выполняющей смазывающее, охлаждающее и вымывающее действие.

При обработке чугуна используют керосин, а для стали – смесь из веретенного масла (25%) и керосина (75%). Для диаметров 25 – 500 мм величина припуска составляет 0,02 – 0,20 мм для чугунных деталей и 0,01 – 0,08 мм – для стальных.

Хонингование производится на горизонтальных и вертикальных одно- и многошпиндельных станках.

Хонингование устраняет овальность, конусность, бочкообразность и другие погрешности формы, обеспечивая точность 5 – 6-го качества и шероховатость поверхности $Ra = 0,32 \div 0,04$ мкм.

10.2.6. Притирка (доводка) отверстий

Притирка – отделочная абразивная обработка, обеспечивающая шероховатость поверхности $Ra = 0,16 \div 0,01$ мкм и точность размеров 5-го качества. Инструментом служит притир, представляющий собой разрезную втулку, на наружной поверхности которой наносятся перекрещивающиеся пазы, а внутренняя поверхность имеет конус. Притиры изготавливаются из чугуна, стали, латуни, меди и других материалов, но более мягких, чем материал обрабатываемой детали.

На поверхность притира наносится паста или суспензия на основе электрокорунда, карбида кремния, карбида бора (зернистостью М20 – М3); алмаза (зернистостью 100 – 1 мкм и мельче). В качестве связывающих материалов в пастах применяют стеарин, парафин, вазелин и олеиновую кислоту.

Притир совершает вращательные и возвратно-поступательные движения с удельным давлением 0,2 – 0,5 мПа.

10.3. МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ РЕЗЬБ

Резьбовые поверхности по своему назначению подразделяются на крепежные и ходовые. К крепежным резьбам относятся метрические (нормальные, тугие, плотные), трубные, дюймовые, упорные (пилообразные) и специальные (часовые, артиллерийские и др.).

Ходовые резьбы прямоугольного, трапециидального и полукруглого профиля применяются в ходовых винтах, в станочных, сборочных и контрольно-измерительных приспособлениях. Они служат для преобразования вращательного движения в поступательное.

На машиностроительных заводах применяется много методов обработки резьб. В зависимости от размеров, класса точности и объема производства нарезание резьб производится на токарных, токарно-револьверных, сверлильных, резьбофрезерных, резьбошлифовальных и резьбонакатных станках. Наружные резьбы нарезают резьбонарезными резцами, гребенками, плашками, фрезами, резьбовыми головками, профилированными шлифовальными кругами, резьбонакатными роликами и плашками. Внутренние резьбы нарезают метчиками, резцами, фрезами.

10.3.1. Нарезание резьб резцами и гребенками

При нарезании резьбы крупного шага ($S > 3$ мм) применяют резцы, работающие по генераторной схеме (рис. 10.15, б).

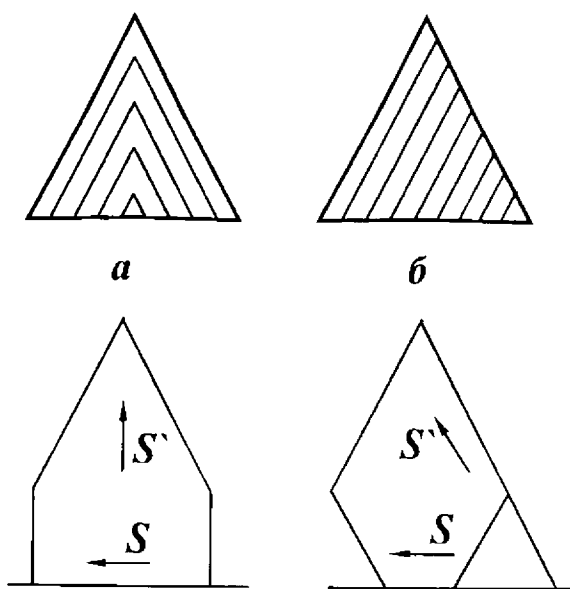


Рис. 10.15. Схема нарезания резьбы: а—профильная, б—генераторная

Профильная схема нарезания резьбы применяется для чистового нарезания (рис. 10.15, а). Нарезание резьбы резцами является малопродуктивным методом обработки, так как формирование полного профиля производится за несколько проходов.

Для сокращения машинного времени применяют резьбовые гребенки, позволяющие сократить число проходов до одного. Основное машинное время нарезания резьбы резцами определяется

$$t_0 = \frac{(l+x) \cdot i}{n \cdot S} \cdot q, \quad (10.4)$$

где l – длина резьбовой части в мм; n – частота вращения детали в об/мин; S – подача на оборот детали, равна шагу нарезания резьбы; i – число проходов в зависимости от диаметра, шага резьбы и обрабатываемого материала, изменяется от 6 до 20; q – число заходов резьбы; x – величина врезания и перебега, равные 2 – 3 ниткам нарезаемой резьбы.

Основное машинное время нарезания резьбы гребенкой определяется по формуле

$$t_0 = \frac{l+x}{nS}. \quad (10.5)$$

Гребенки (рис. 10.16) по своей конструкции разделяются на плоские, призматические и круглые. Для предварительной обработки крупногабаритные резьбы наиболее целесообразно нарезать вихревым методом (рис. 10.17). Он заключается в следующем: обрабатываемая деталь вращается с частотой 30 – 100 об/мин, а резец, закрепленный в резцовой головке, вращается с частотой 1000 – 3000 об/мин.

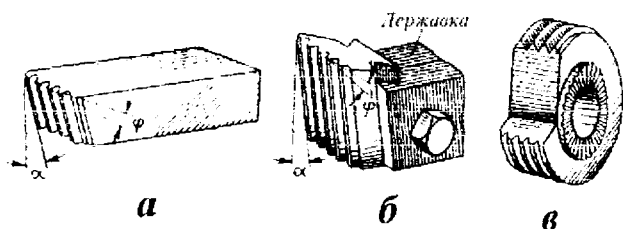


Рис. 10.16. Резьбовые гребешки:
а – стержневая, б – призматическая,
в – круглая

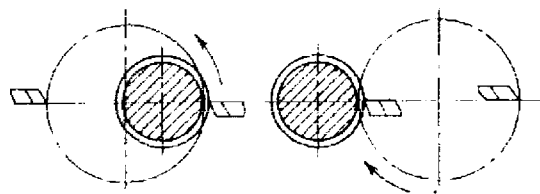


Рис. 10.17. Схема вихревого на-
резания резьбы

За каждый оборот резцовой головки резец соприкасается с деталью, срезая по дуге небольшой слой. Резцовая головка расположена эксцентрично по отношению к оси вращения обрабатываемой детали и повернута на величину угла подъема винтовой линии резьбы. В резцовой головке могут закрепляться один, два или четыре резца. За каждый оборот детали при перемещении вращающейся головки вдоль оси детали на величину шага резьбы на детали будет сформирован один виток резьбы.

10.3.2. Нарезание резьбы метчиками, плашками и резьбонарезными головками

Метчиками, плашками и нарезными головками нарезаются резьбы небольшого диаметра. В зависимости от способа нарезания метчики разделяются на машинные, применяемые для нарезания резьбы на станках, и слесарные, применяемые при ручном нарезании резьб.

Нарезание резьбы машинными метчиками производится на сверлильных, револьверных и токарно-револьверных автоматах, имеющих обратный ход для вывинчивания инструмента. Рабочая часть метчика состоит из заборной и калибрующей частей.

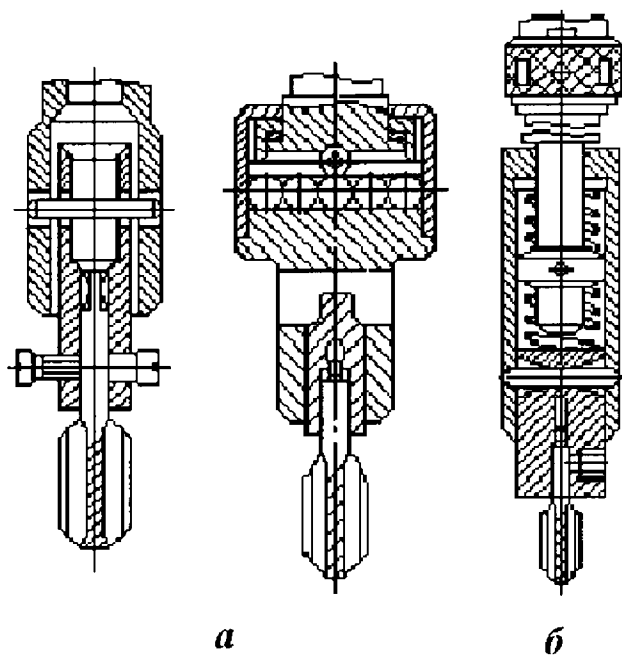


Рис. 10.18. Патроны для крепления метчиков: *а* – плавающий; *б* – компенсирующий

Машинными метчиками резьба нарезается за один проход. Метчики крепятся на шпинделе станка в патронах. На револьверных станках и токарно-револьверных автоматах применяют жесткие патроны. Для самоустановки метчика по оси нарезаемого отверстия применяют плавающие патроны (рис. 10.18, *а*). Для согласования подачи станка с шагом резьбы применяются компенсирующие патроны (рис. 10.18, *б*). Такие патроны применяются на револьверных станках, где часто отсутствует согласо-

вание подачи револьверной головки станка с шагом нарезаемой резьбы. Для нарезания резьбы в гайках на специальных гайконарезных автоматах применяются машинные метчики с изогнутым хвостовиком. Применение таких гаечных метчиков обеспечивает непрерывный процесс обработки, высокую производительность (от 1000 до 3000 гаек до переточки) и довольно высокую точность (рис. 10.19). Наружные резьбы нарезают плашками или резьбонарезными головками.

Плашка представляет собой разрезное кольцо с внутренней резьбовой поверхностью. При навинчивании ее на цилиндрическую поверхность происходит нарезание резьбы. Этот метод нарезания резьб малопроизводителен, так как требует дополнительного времени для свинчивания при обратном ходе инструмента.

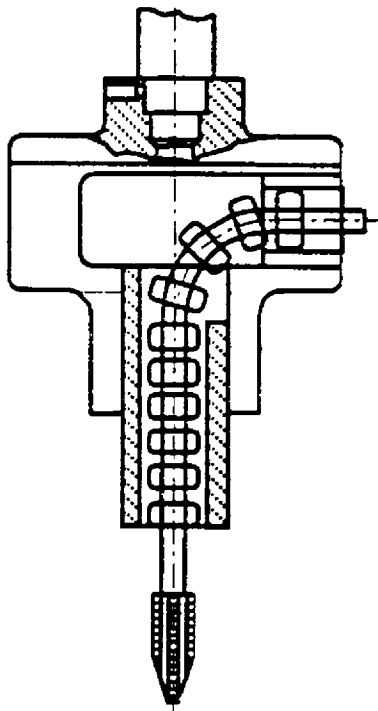


Рис. 10.19. Схема нарезания резьбы в гайках изогнутым метчиком

Основное время для нарезания резьбы метчиками и плашками определяется по формуле

$$t_0 = \left(\frac{l+x}{n \cdot S} + \frac{l+x}{n_1 \cdot S} \right) \cdot i, \quad (10.6)$$

где l – длина нарезаемой резьбы, мм;
 x – величина врезания и перебега, равная $\frac{2}{3} \cdot S$ в мм; n_1 – частота вращения заготовки при обратном ходе, об/мин; n – частота вращения заготовки при прямом ходе, об/мин; S – подача на оборот заготовки, равна шагу нарезаемой резьбы, мм/об.

В серийном и массовом производстве вместо плашек применяют самооткрывающиеся резьбонарезные головки. Резьбонарезные головки по своей конструкции разделяются на три вида: с плоскими, тангенциальными и круглыми резцами. Резьбонарезные головки обеспечивают нарезание резьб более высокого класса точности. Основное (машинное) время при нарезании резьб самооткрывающимися головками определяется по формуле

$$t_0 = \frac{l+x}{n \cdot S}, \quad (10.7)$$

где $x = (2 \div 3) \cdot S$.

10.3.3. Фрезерование резьбы

Для фрезерования резьб применяют дисковые и гребенчатые фрезы. Дисковые фрезы используют при нарезании длинных резьб с крупным шагом. Профиль дисковой фрезы соответствует профилю

нарезаемой резьбы. При этом вращение фрезы является рабочим движением резания, а вращение детали – движением круговой подачи.

Фрезерование резьбы гребенчатой фрезой применяется для получения коротких резьб. Гребенчатая фреза представляет собой набор дисковых фрез. Ширина набора фрез делается на 2 – 3 нитки больше длины резьбовой части детали. Цикл нарезания резьбы равен 1,25 оборота детали. При нарезании резьбы фреза устанавливается на суппорте резьбофрезерного станка параллельно оси детали. Резьба получает вращательное движение резания и продольную подачу. Деталь закрепляется в патроне станка и получает медленное вращательное движение подачи. За полный оборот детали фреза перемещается на величину шага резьбы. В первоначальный момент фреза врезается в заготовку на полную глубину резьбы, а затем за 1,25 оборота детали полностью нарезается. Дополнительные 0,25 оборота детали предусмотрены для перекрытия времени врезания фрезы в заготовку. Основное (машинное) время обработки при нарезании резьбы гребенчатой фрезой определяется по формуле

$$t_0 = \frac{1,25}{n_d}, \quad (10.8)$$

где n_d – частота вращения детали об/мин.

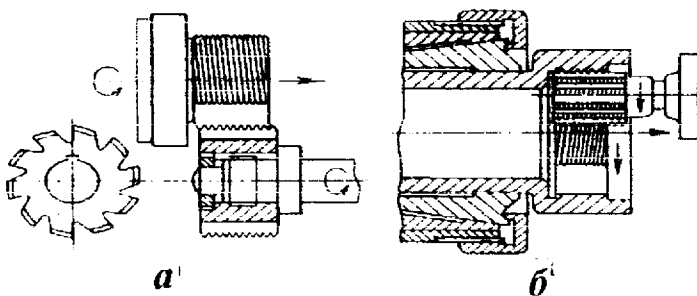


Рис. 10.20. Схема нарезания резьбы гребенчатой фрезой: *a* – наружной; *b* – внутренней

Производительность резьбофрезерования гребенчатой фрезой во много раз выше, чем нарезание резцом и обеспечивает стабильное качество поверхности и точность обработки. Схема фрезерования наружной и внутренней резьбы показана на рис. 10.20.

10.3.4. Накатывание резьбы

Процесс формирования резьбы при накатывании происходит без снятия стружки путем выдавливания. Процесс сопровождается большими усилиями, под действием которых происходит пластическая

деформация и уплотнение материала заготовки. Чем выше пластичность обрабатываемого материала, тем выше качество накатываемой резьбы.

Накатывание резьбы производится: плоскими накатными плашками, накатными роликами и сегментами.

Накатывание плоскими плашками производится на станках МФ-103, МФ-128, 5А935 с автоматизированным циклом обработки.

На рис.10.21 показана схема накатывания резьбы плоскими плашками. Плашка 1 неподвижна, плашка 2 установлена на ползуне, совершающем прямолинейные возвратно-поступательные движения.

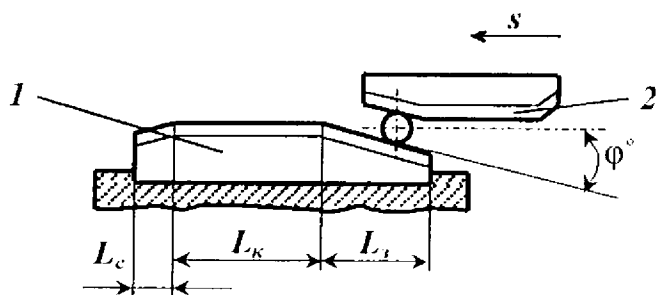


Рис. 10.21. Схема накатывания резьбы плоскими пластинами: $l_з$ – заходная часть, $l_к$ – калибрующая часть, $l_с$ – сбег резьбы

Рабочая поверхность плашек имеет прямолинейную резьбу с профилем и углом подъема, соответствующими профилю и углу подъема накатываемой резьбы. Плашка имеет заборные конуса для захвата заготовки. Резьба накатывается за время одного хода ползуна.

Этот способ применяется для накатки деталей ограниченного диапазона диаметром от 3 до 24 мм из цветных металлов и конструкционных сталей $\sigma_B < 60 \text{ кгс/мм}^2$. Способ требует длительной переналадки станка и имеет низкую стойкость инструмента, исключает возможность накатывания резьб на пустотелых деталях (втулках). Эти ограничения сдерживают область применения процесса накатки резьбы плашками на машиностроительных заводах.

В практике наибольшее распространение получил процесс накатывания резьбы круглыми вращающимися роликами. Этот способ значительно отличается от условий работы плоскими плашками и обладает более широкими технологическими возможностями.

Процесс накатывания роликами характеризуется:

- значительно меньшим давлением, что создает возможность накатывания резьбы в пустотелых деталях из высокопрочных, термически обработанных сталей $\sigma_B = 120 \text{ кгс/мм}^2$ до HRC 40;

- имеет значительно меньшие габариты станка с более широким диапазоном размеров накатываемых резьб – от 5 до 60 мм.

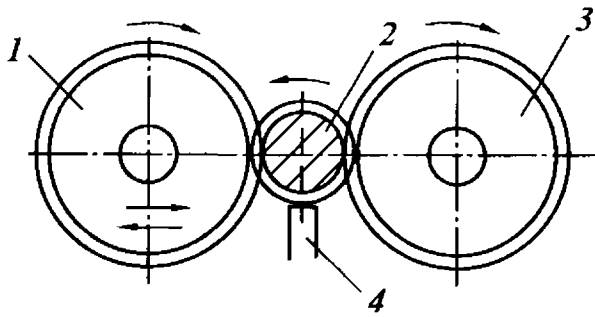


Рис. 10.22. Схема накатывания резьбы с радиальной подачей

Схема накатывания резьбы с радиальной подачей двумя роликами показана на рис. 10.22. Заготовка 2 помещается на направляющей планке 4, располагаемой между роликами 1÷3. При накатывании оба ролика вращаются в одну сторону и один из них получает радиальную подачу от привода.

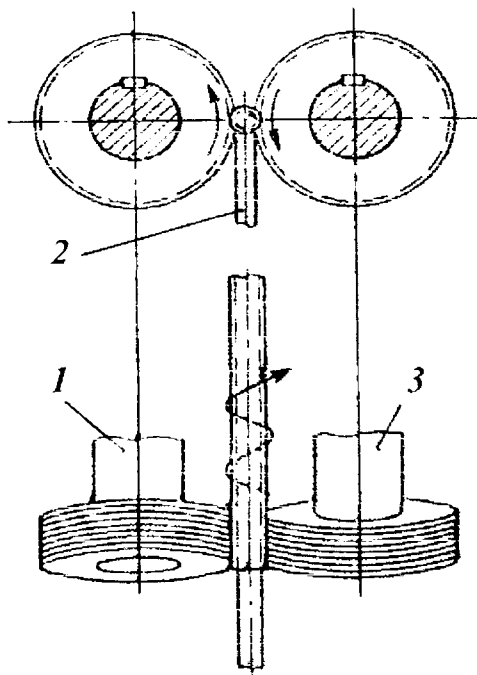


Рис. 10.23. Схема накатывания резьбы с осевой подачей: 1,3 – резьбонакатные ролики, 2 – опора

где d_H – наружный диаметр резьбы; d_B – внутренний диаметр резьбы.

Накатывание резьбы накатными роликами осуществляется с радиальной и осевой подачами.

Накатывание резьбы с радиальной подачей осуществляется двумя или тремя роликами. Ролики имеют резьбу, направленную противоположно направлению нарезаемой резьбы, т. е. правая резьба накатывается роликом с левой резьбой и наоборот.

При накатывании с осевой подачей сохраняется постоянное расстояние между осями роликов, имеющих винтовую или кольцевую нарезку и установленных под углом, равным углу подъема накатываемой резьбы (рис. 10.23).

Ролики с кольцевой нарезкой по сравнению с роликами с винтовой нарезкой имеют ряд преимуществ:

- обеспечивается возможность обработки длинных резьб;
- диаметр роликов не зависит от диаметра накатываемой резьбы.

Размер заготовки под накатку резьб определяется по формуле

$$d_3 = \sqrt{0,5 \cdot (d_H^2 + d_B^2)}, \quad (10.9)$$

10.3.5. Шлифование резьбы

Шлифование резьбы применяется при изготовлении закаленных изделий с точной резьбой. Шлифование резьбы осуществляется одноконтурным или многоконтурным абразивными кругами. При многоконтурном врезном шлифовании длина шлифуемой резьбы на детали должна быть меньше на 3 – 4 шага ширины круга. Шлифование производится методом врезания на полную глубину профиля при наличии медленного вращения заготовки.

Для нарезания длинных резьб применяют многоконтурное шлифование с продольной подачей. Заборный конус на многоконтурном круге создает условие чернового, получистового и чистового шлифования.

Шлифование резьбы одноконтурным абразивным кругом применяется для получения наружных и внутренних резьб. Профилируют многоконтурные круги путем накатывания на круг винтовой поверхности стальным роликом.

10.4. МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ ЗУБЬЕВ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС

В зависимости от условий эксплуатации зубчатых колес назначается определенная степень точности их изготовления. Например, зубчатые колеса, предназначенные для передачи с особо строгой согласованностью движений или работающих при окружных скоростях 100 – 150 м/с должны изготавливаться по 3-й и 4-й степени точности по СТ СЭВ641–77.

Зубчатые колеса редукторов двигателей внутреннего сгорания, коробок скоростей автомашин и станков, предназначенные для передачи с точной согласованностью вращения на повышенных скоростях (прямозубые – до 15 м/с, косозубые до 30 м/с) при больших нагрузках, изготавливают по 6-й степени точности. Умеренно нагруженные высокооборотные (прямозубые – до 10 м/с, косозубые до 15 м/с) изготавливают по 7-й степени точности. Зубчатые колеса общего машиностроения (например, для станков), не входящие в делительные цепи, зубчатые колеса для сельскохозяйственных машин изготавливают по 8-й степени точности. Не нагруженные тихоходные зубчатые колеса изготавливают по 9-й степени точности.

Согласно ГОСТ 1643 – 72, качество изготовления зубчатых колес оценивается нормами кинематической точности, плавности работы передачи и нормали контакта зубьев. Кроме того, стандарт регламентирует нормы бокового зазора, который служит для компенсации погрешностей изготовления зубчатых колес, обеспечения нормальных условий смазки, а также компенсации погрешностей сборки и температурных деформаций.

Исходя из конкретных условий работы передачи, назначаются определенные нормы кинематической точности, плавности работы передачи и контакт зубьев.

По ГОСТ 1643 – 72 степень точности зубчатого колеса обозначается трехзначным числом и одной из букв по виду сопряжения. Например, 7-6-6-B или 8-7-6-C. Первая цифра характеризует степень кинематической точности колеса, вторая – плавность работы передачи, третья – контакт зубьев, буква характеризует боковой зазор.

Требование получения высокой точности и плавности зацепления зубчатых колес, а также стремление повысить производительность зубонарезания привели к созданию специальных зуборезных станков. Наиболее распространенными методами нарезания зубчатых венцов является фрезерование и зубодолбление.

При обработке на зубодолбежных станках получается более правильный профиль эвольвенты, чем при зубофрезеровании. Поэтому метод зубодолбления применяется для чистового нарезания зубьев, а метод зубофрезерования двух- или трехзаходными фрезами для чернового нарезания.

На зубофрезерных станках можно нарезать зубчатые венцы шестерен с прямыми и наклонными зубьями, червячные зубчатые колеса, червяки, шлицевые валики, цепные колеса.

10.4.1. Обработка цилиндрических зубчатых колес

Нарезание зубьев. Зубья колес можно нарезать методом копирования и методом обкатки.

В первом случае применяют инструмент – пальцевые или дисковые фрезы с зубьями, имеющими форму профиля впадины колеса. Нарезание производят на фрезерных станках с использованием делительных устройств (головок).

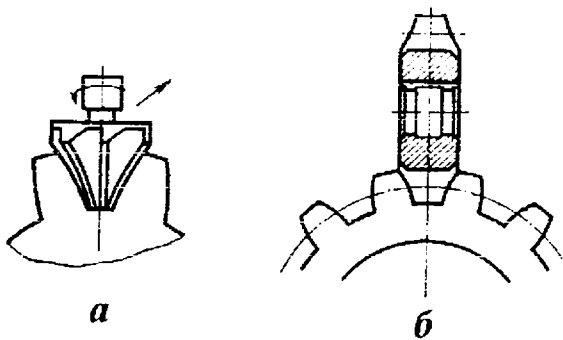


Рис. 10.24. Фрезерование впадин зуба методом копирования :
a – пальцевой фрезой;
б – дисковой фрезой

На рис.10.24 приведены схемы нарезания зубчатых колес методом копирования пальцевой и дисковой фрезами. Этот метод является неточным и малопродуктивным. Иногда этим методом производят черновое нарезание зубьев.

Более точным и производительным методом обработки зубьев является метод обкатки на зубодолбежных или зубофрезерных станках.

Зубодолбление цилиндрических колес. Зубодолбление производится на станках типа 5А12, 5А14, 5А16, «Комсомолец», «Феллоу», «Лоренц» и других. На зубодолбежных станках можно нарезать прямые и спиральные зубья колес как наружного, так и внутреннего зацепления. На рис.10.25 приведены примеры нарезания зубьев цилиндрических колес долблением.

При нарезании спиральных зубьев штассель с закрепленным на нем долбяком совершает возвратно-поступательные винтовые движения. Режимы резания: $V = 12 \div 18$ м/мин, $S_{кр} = 0,25 \div 0,5$ мм/дв.ход. (для черновой обработки); $V=20 \div 30$ м/мин, $S_{кр} = 0,15 \div 0,3$ мм/дв.ход (для чистовой обработки).

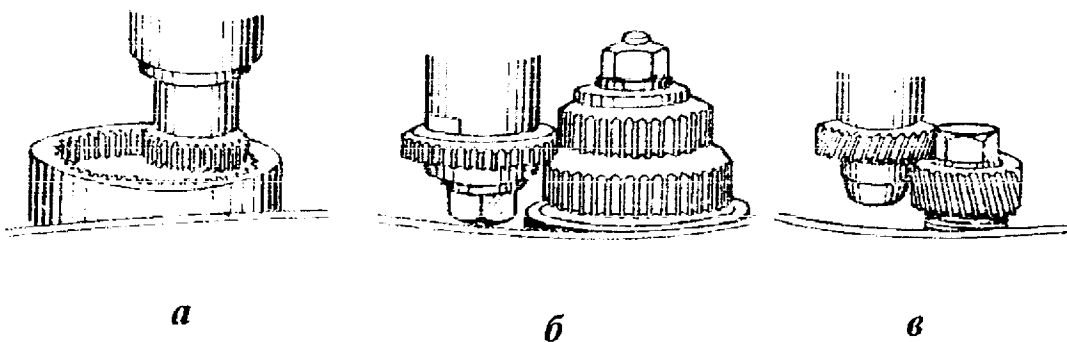


Рис. 10.25. Примеры зубодолбления цилиндрических колес

Основное машинное время (мин) при зубодолблении подсчитывается по формуле

$$t_0 = \frac{\pi \cdot m \cdot z_d \cdot i}{n \cdot S_0} + \frac{h}{n \cdot S_{рад}}, \quad (10.10)$$

где m – модуль; z_d – число зубьев долбяка; n – число двойных ходов в минуту; h – высота зуба в мм; i – число проходов; S_0 – круговая подача; $S_{\text{рад}}$ – радиальная подача.

Зубчатые колеса модулем 1–2 мм нарезаются за один проход, с модулем 2,25 – 4 мм за два прохода и с модулем больше 4 мм нарезаются за 3 прохода. С целью увеличения производительности зубодолбежных станков при нарезании зубчатых колес малых и средних модулей применяют комбинированные долбяки, которые производят последовательное черновое и чистовое нарезание зубьев за один оборот долбяка. У таких долбяков часть зубьев имеет заниженную толщину. Они выполняют черновое нарезание профилей зубьев, другая часть удаляет оставшийся припуск при чистовом нарезании.

На долбяке предусмотрен участок со срезанными зубьями, который позволяет снимать и устанавливать детали без отвода шпинделя с долбяком.

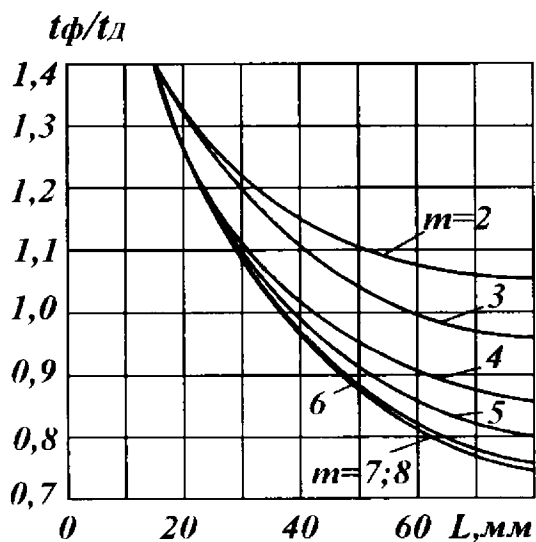


Рис. 10.26. Сравнительный график производительности процессов зубофрезерования и зубодолбления

Следует заметить, что комбинированные долбяки пригодны для нарезания зубчатых колес только с определенным числом зубьев. Следовательно, эти долбяки целесообразно применять только на заводах массового и крупносерийного производства. Комбинированные долбяки пригодны только для нарезания зубчатых колес с малым числом зубьев, так как число зубьев этих долбяков должно быть равно удвоенному числу зубьев нарезаемого колеса. Зубодолбежные станки обеспечивают 7–8-ю степень точности. Они позволяют производить

обработку зубчатых венцов в блочных зубчатых колесах с двумя, четырьмя венцами.

На рис.10.26 дан сравнительный график производительности процессов зубофрезерования и зубодолбления. Из анализа графика видно, что при малых модулях и большой длине зубчатого венца выгоднее применять зубофрезерование.

Зубофрезерование. Зубофрезерование наружных зубчатых колес с прямыми и косыми зубьями, а также червячных колес производится на зубофрезерных станках типа «Комсомолец», 5Д32, 5Е32 и др.

Режущим инструментом являются червячные фрезы с прямолинейными кромками режущих зубьев, направленными под углом зацепления. Фрезы бывают однозаходные и многозаходные. В процессе нарезания червячная фреза и нарезаемое червячное колесо находятся в состоянии зацепления. Это зацепление соответствует червячной передаче с передаточным числом

$$i = n_{\text{ф}} / n_3 = z_3 / k,$$

где $n_{\text{ф}}$ и n_3 — частота вращения фрезы и зубчатого колеса в минуту; k и z_3 — число заходов червячной фрезы и число зубьев нарезаемого колеса.

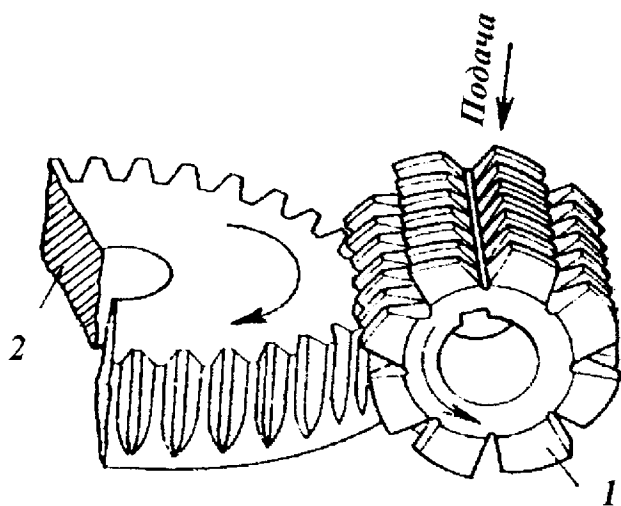


Схема нарезания зубьев показана на рис.10.27. Фреза 1 устанавливается под углом подъема зубьев фрезы на делительном цилиндре. Заготовка 2 получает вращательное движение, а фреза, кроме вращательного движения, имеет еще поступательное движение подачи вдоль образующей поверхности колеса.

Рис. 10.27. Схема фрезерования зубьев

цилиндрических зубчатых колес на станке настраиваются три гитары:

гитара главного движения, обеспечивающая требуемую скорость резания; гитара осевой подачи, обеспечивающая перемещение фрезерного суппорта за период полного поворота зубчатого колеса; гитара обкатки, обеспечивающая равенство скоростей продольного перемещения прямобоковой исходной режущей рейки и вращения зубчатого колеса. Для обеспечения обкатки нарезаемого зубчатого колеса по исходной режущей рейке необходимо выполнить при настройке гитары обкатки следующее условие.

Один оборот фрезы должен соответствовать повороту заготовки на угол k / z_3 , где k – число заходов фрезы; z – число зубьев нарезаемого зубчатого колеса.

При обработке зубчатых колес с наклонными зубьями настраиваются четыре гитары: гитара главного движения, гитара подач, гитара обкатки и гитара дифференциала. Последняя гитара настраивается исходя из следующих условий. Фрезерный суппорт перемещается вдоль оси заготовки на величину шага спирали, обрабатываемого зубчатого колеса, а заготовка за это время должна сделать один полный оборот.

При нарезании зубчатых колес с наклонными зубьями фрезерный суппорт устанавливается с учетом наклона винтовой линии витков фрезы α и угла спирали зуба зубчатого колеса β .

Если направление наклона винтовой линии фрезы и нарезаемого зубчатого колеса одинаковы (фреза и зубчатое колесо правозаходные и левозаходные), то угол установки фрезы равен разности углов фрезы и зубчатого колеса, т. е. $\beta' = \alpha - \beta$; если же направление наклона винтовой линии фрезы и зубчатого колеса различно, то угол установки равен сумме углов, т. е. $\beta' = \alpha + \beta$.

В зависимости от величины модуля устанавливается число проходов фрезы: зубчатое колесо с модулем до 2,5 мм нарезают за один проход – начисто; зубчатое колесо с модулем более 2,5 мм нарезают за два прохода – начерно и начисто.

Кроме обычной схемы зубофрезерования цилиндрических зубчатых колес, известен метод диагонального зубофрезерования. Здесь обработка производится при наличии двух подач: продольной – вдоль оси обрабатываемой заготовки и тангенциальной – вдоль оси червячной модульной фрезы.

При такой схеме обработки участвуют в резании все режущие зубья фрезы, что способствует повышению ее стойкости. Однако точность обработки при диагональном зубофрезеровании снижается из-за погрешностей в кинематической цепи усложненного механизма фрезерной головки. Практически установлено, что при фрезеровании зубьев колес из стали средней твердости черновые проходы выполняются на скоростях резания 25 – 30 м/мин, а чистовые – 35 – 40 м/мин. Соответственно продольная подача фрезы принимается на черновых проходах 1.5 – 2 мм на оборот заготовки и 0.5 – 1 мм на чистовых проходах.

Основное машинное время (мин) зубофрезерования подсчитывается по формуле

$$t_0 = \frac{m \cdot l + l_1}{n \cdot S \cdot k} z \cdot i, \quad (10.11)$$

где l – ширина зубчатого венца в мм; l_1 – величина врезания и перебега, мм; i – число проходов; n – частота вращения фрезы в об/мин; z – число зубьев колеса; S – подача в мм/об; m – число одновременно нарезаемых зубчатых колес; k – число заходов фрезы (для чистовых проходов $k = 1$, для черновых рекомендуется $k = 2$).

Накатывание цилиндрических зубчатых колес. Накатывание зубчатых венцов в 15 – 20 раз имеет большую производительность по сравнению с зубофрезерованием. Отходы металла составляют всего лишь 3 – 4% от веса заготовки. Зубья модулем до 1 мм накатываются в холодном состоянии, а более 1 мм – в горячем. В холодном состоянии мелко модульные зубчатые колеса можно накатывать на токарных станках с продольной подачей (рис. 10.28, а),

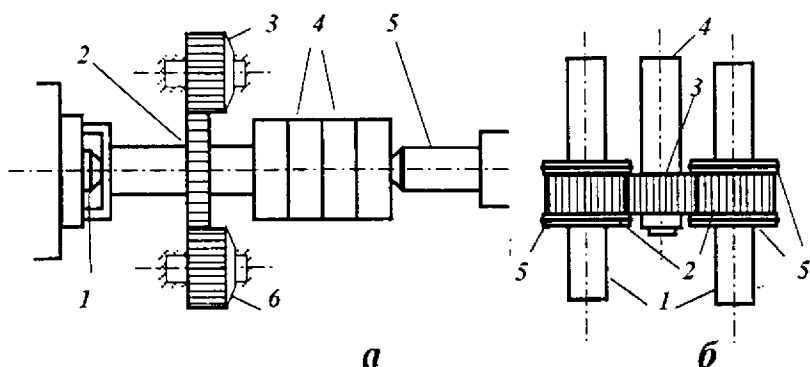


Рис. 10.28. Методы накатывания зубьев цилиндрических зубчатых колес: а – на токарном станке, б – на специальном стенде

В переднем 1, заднем 5 центрах устанавливается оправка, получающая вращение от шпинделя станка. На оправке устанавливаются заготовки 4 и делительное зубчатое колесо 2, находящееся в начале процесса накатки в зацеплении с двумя или тремя накатными роликами, закрепленными на суппорте станка. При выходе из зацепления с делительным зубчатым колесом 2 накатники приводятся во вращение зубьями накатанной части заготовок.

Для образования симметричного профиля зубьев накатывание производится сначала в одном, а затем в обратном направлении с ускоренным обратным вращением шпинделя. Накатники 3 и 6 представляют собой зубчатые колеса с модулем, равным модулю накатываемого колеса. Накатники имеют заборную часть для постепенного

внедрения в металл обрабатываемых заготовок. Степень точности накатываемых колес примерно 8-я.

При накатывании зубчатых венцов с нагревом применяются специальные станды. Схема накатывания с радиальной подачей показана на рис. 10.28, б. Накатники 2 с ограничителями 5 вращаются на шпинделях 1. Заготовка 3 закрепляется на оправке 4. За 20 – 30 сек до накатывания зубчатого венца слои заготовки нагреваются токами высокой частоты до $1000 - 1200^{\circ}\text{C}$. Точность зубчатых колес после накатки соответствует 9-й степени. Упрочнение поверхности зубьев значительно повышает износостойкость зубчатых колес.

10.4.2. Обработка червячных зубчатых колес

При нарезании червячных зубчатых колес ось фрезы устанавливается перпендикулярно оси обрабатываемого колеса, располагаясь по центру ее ширины. Червячные зубчатые колеса нарезают, используя радиальную и тангенциальные подачи.

Способ радиальной подачи. Скорость вращения фрезы 1 нарезаемого зубчатого колеса 2 (рис. 10.29, а) рассчитывают так, чтобы за один оборот фрезы колесо повернулось на число зубьев, равное числу заходов червяка. Стол зубофрезерного станка с закрепленной заготовкой осуществляет в горизонтальной плоскости подачу на глубину зуба в радиальном направлении.

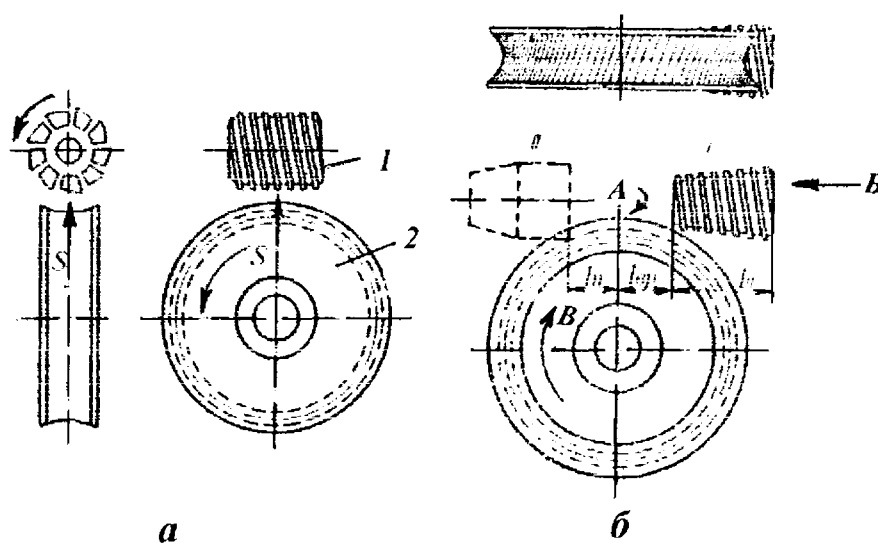


Рис. 10.29. Схемы нарезания червячных зубчатых колес :
а – способ радиальной подачи; **б** – способ тангенциальной подачи

Недостаток указанного способа заключается в том, что червячная фреза работает ограниченным числом режущих кромок, которые подвергаются интенсивному износу.

Способ тангенциальной подачи. Способ тангенциальной подачи применяется для нарезания червячных зубчатых колес к многозаходным червякам. Он выполняется при помощи специального суппорта, позволяющего осуществлять тангенциальную подачу фрезы (рис. 10.29, б). Стрелка А указывает вращение фрезы, стрелка Б – продольную подачу по касательной линии к зубчатому колесу, стрелка В – вращение зубчатого колеса.

10.4.3. Обработка конических зубчатых колес

Для нарезания зубьев конических зубчатых колес 7 – 8-й степени точности применяются специальные зубострогальные станки. Зубострогальные станки (рис. 10.30, а) работают методом обката.

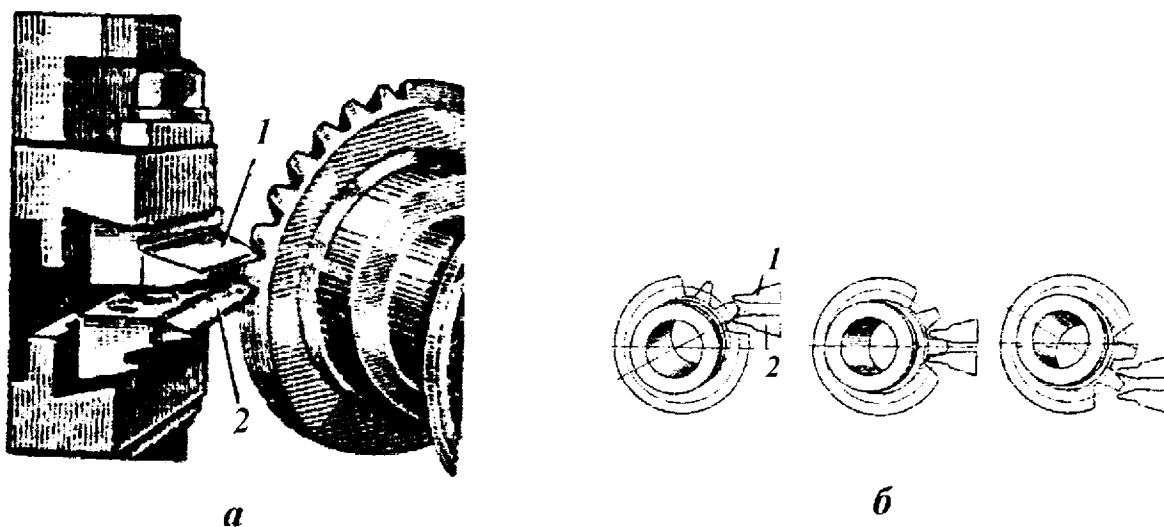


Рис. 10.30. Нарезание конического зубчатого колеса на зубострогальном станке: а – установка резцов; б – схема обкатки; 1 и 2 – резцы

Два строгальных резца 1 и 2 совершают прямолинейные возвратно-поступательные движения вдоль зубьев обрабатываемой заготовки. При обратном движении резцов они отводятся от обрабатываемой поверхности с целью уменьшения износа режущей кромки резцов. Резцы образуют прямобочную режущую рейку, которая, обкатываясь по нарезаемому зубчатому колесу, формирует эвольвентный

профиль зубьев. На рис. 10.30, б показаны три различных положения исходной режущей рейки, соответствующие началу, середине и концу обработки одного зуба. После выхода резцов из зацепления с обработанным зубом, происходит автоматическое деление заготовки для обработки следующего зуба. Нарезание конических зубчатых колес с криволинейными зубьями обычно производят резцовой головкой с профилем зуба по дуге окружности. Спирально-конические зубчатые колеса обрабатываются по методу обкатки производящего воображаемого колеса с заготовкой.

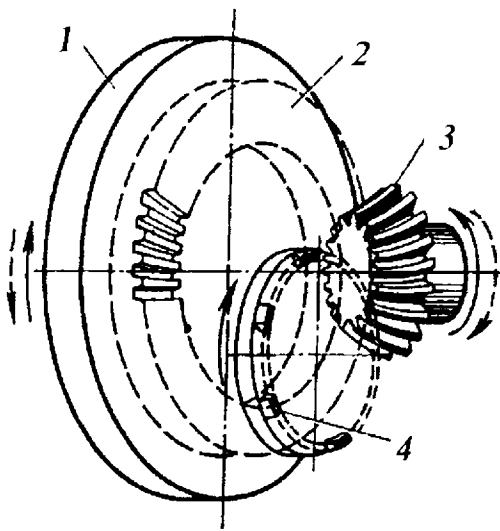


Рис. 10.31. Нарезание конических колес с криволинейными зубьями: 1 – инструментальный барабан, 2 – воображаемое производящее колесо, 3 – нарезаемое зубчатое колесо, 4 – зуборезная головка с резцами

На рис. 10.31 приведена схема работы станка для нарезания конических зубьев с профилем по дуге окружности резцовой головкой. На планшайбе зуборезного станка 1 устанавливается вращающаяся резцовая головка 4, которая воспроизводит криволинейный зуб воображаемого плоского спирально-конического колеса. Заготовка зубчатого колеса в конце цикла обработки выходит из зацепления с резцовой головкой и в этом положении производится деление на следующий зуб.

По конструкции резцовые головки делятся на односторонние и двусторонние. Двусторонние головки прорезают обе стороны впадины, они применяются для черновой обработки. Чистовое нарезание производится односторонними головками, т. е. сначала нарезается один профиль зуба, а затем второй.

10.4.4. Обработка червяков

Червячные передачи бывают с цилиндрическим (геликоидальным) и глобоидным червяком. Сечение витков цилиндрического червяка с осевой плоскостью представляет собой прямолинейную рейку, а у глобоидного – круговую.

Среди цилиндрических червяков наибольшее применение для неотчетственных передач получил винтовой червяк (с архимедовой

спиралью), представляющий собой обычный винт с трапецеидальной резьбой (рис. 10.32, *а*). Червячная пара с таким червяком обладает низким КПД и подвержена быстрому износу, поэтому ее применяют в тихоходных слабонагруженных передачах. Другой разновидностью цилиндрического червяка является эвольвентный червяк (рис. 10.32, *б*). Третьей разновидностью цилиндрического червяка является конволютный червяк (рис. 10.32, *в*).

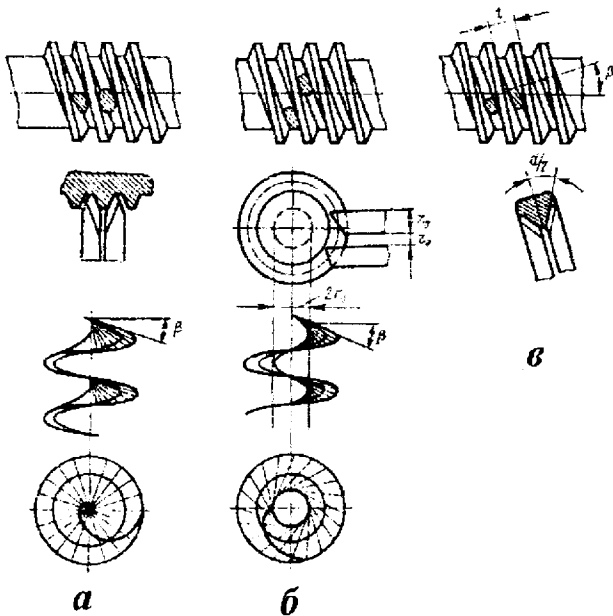


Рис. 10.32. Схемы образования профиля червяков: *а* – архимедового; *б* – эвольвентного; *в* – конволютного

Глобоидные червяки имеют большую поверхность соприкосновения витков с зубьями червячного колеса, что обеспечивает уменьшение удельных нагрузок и, как следствие, уменьшение износа поверхностей червячной пары.

Наиболее простым способом изготовления витков червяка с архимедовой спиралью является нарезание резцом на токарно-винторезном станке. При обработке прямолинейная режущая кромка двух резцов совмещается с плоскостью, проходящей через ось червяка. При

этих условиях обработки в сечении червяка, перпендикулярном его оси, получается архимедова спираль (рис. 10.32, *а*).

Нарезание витков эвольвентного червяка производится двумя резцами, прямолинейные режущие кромки которых располагаются выше и ниже осевой плоскости червяка основного цилиндра винтовой эвольвентной поверхности (рис. 10.32, *б*).

Винтовая поверхность называется эвольвентной, так как в торцевой плоскости червяка получается эвольвента. При нарезании витков конволютного червяка (рис. 10.32, *в*) резцы устанавливаются так, чтобы их режущие кромки совпадали с плоскостью нормальной и винтовой поверхности.

Описанные методы нарезания винтовой поверхности червяков обеспечивают хорошую точность, но имеют малую производительность.

В серийном производстве витки червяков обрабатывают дисковыми фрезами на специальных резьбонарезных станках. Фрезы имеют профиль впадины в нормальном сечении и устанавливаются под углом наклона винтовой линии β .

10.4.5. Методы чистовой обработки зубчатых колес

С увеличением быстроходности машин возникла настоятельная необходимость в бесшумно работающих зубчатых колесах. Шум, вызываемый зубчатыми колесами, связан, в основном, с точностью изготовления элементов зубчатых колес. Повышение точности зубчатых колес, способствующее улучшению динамических характеристик зацепления и уменьшению шума достигается: применением рациональных способов окончательной чистовой обработки зубьев и применением специальных высокопрочных сталей и неметаллических материалов (пластмасс, текстолита и др.).

Окончательная чистовая обработка зубчатых венцов шестерен зависит от их формы, твердости материала и требуемой точности. Для отделки зубьев на машиностроительных заводах применяют: обкатку, шевингование, шлифование и притирку.

Обкаткой называют процесс получения гладкой поверхности зубьев незакаленного зубчатого колеса путем обкатывания его между тремя вращающимися закаленными зубчатыми колесами (эталоном), точность которых находится в пределах ± 5 мкм.

Шевингованием (бреющим резанием) называется процесс чистовой обработки зубьев незакаленного зубчатого колеса (твердостью до $HRC < 40$), заключающийся в удалении очень тонких стружек специальным инструментом – шевером.

Шевер представляет собой зубчатое колесо или рейку с прорезанными на боковых сторонах каждого зуба поперечными канавками глубиной 0,8 мм. Эти канавки образуют режущие кромки, которые соскабливают волосообразные стружки. Оправка с обрабатываемым зубчатым колесом (рис. 10.33) закрепляется в центрах станка. Шевер располагается над зубчатым колесом под углом 15° , образуя с колесом как бы винтовую пару со скрещивающимися осями. Шевер вращает обрабатываемое зубчатое колесо, которое совершает осевое возвратно-поступательное перемещение, называемое продольной подачей ($S_{пр} = 0,15 \div 0,3$ мм на один оборот зубчатого колеса).

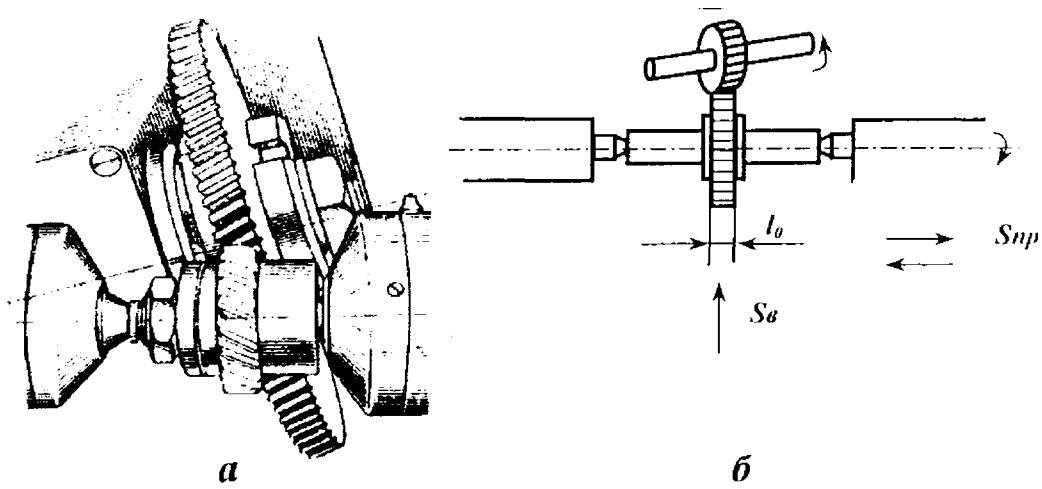


Рис. 10.33. Шевингование цилиндрического зубчатого колеса дисковым шевером: *a* – общий вид (подача продольная); *б* – схема шевингования с вертикальным перемещением стола станка

Для удаления стружки шевер получает вертикальное перемещение (подачу на врезание $S_B = 0,025 \div 0,04$ мм на один ход стола). Припуск на шевингование на сторону колеблется в пределах 0.04 – 0.06 мм. Основное время на операцию шевингования цилиндрических зубчатых колес дисковым шевером определяется по следующей формуле:

$$t_0 = \frac{(l_0 + l_{вр} + l_{г}) \cdot z}{n_{шев} \cdot z_{шев} \cdot S_{пр}} \cdot \frac{a}{S_B} \cdot k \quad (\text{мин}), \quad (10.12)$$

где l_0 – длина зуба шестерни, мм; $l_{вр}$ и $l_{г}$ – врезание и перебег, в сумме равные 10 мм; z – число зубьев зубчатого колеса; a – припуск на сторону в мм; $n_{шев}$ – число оборотов шевера; $S_{пр}$ – продольная подача в мм на оборот зубчатого колеса; S_B – вертикальная подача в мм на один ход стола; k – коэффициент, учитывающий дополнительные калибрующие проходы $k = 1,1 \div 1,2$.

Припуск под шевингование зависит от модуля зубчатого колеса.

Модуль в мм	2	3	4	5	6
Припуск в мм	0,03	0,04	0,05	0,055	0,06

В табл. 10.3 представлены данные, характеризующие степень исправления погрешностей шевингованием.

Таблица 10.3

Наименование погрешности	Величина погрешности в мм	
	до шевингования	после шевингования
1. Суммарная ошибка межцентрового расстояния	0,06 – 0,1	0,02
2. Радиальное биение	0,05 – 0,07	0,01
3. Отклонение направления зуба	0,05	0,01
4. Отклонение профиля	0,04 – 0,08	0,01
5. Накопленная ошибка шага	0,05 – 0,07	0,03

На рис.10.34 показаны шеввер-рейка и схема, поясняющая осуществление продольного скольжения зубьев шеввер-рейки по зубьям шестерни.

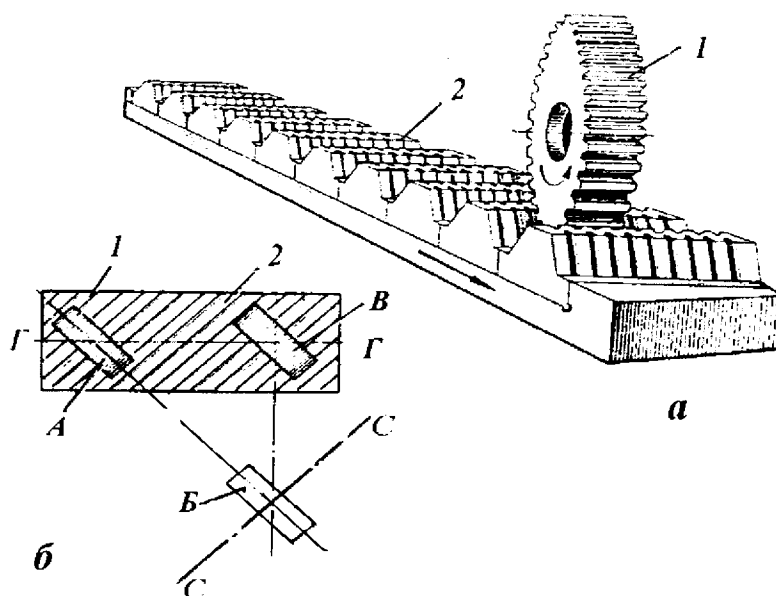


Рис. 10.34. Шевингование шеввер-рейкой: *а* – шеввер-рейка; *б* – схема скольжения шеввер-рейки по зубьям зубчатого колеса.

Если обрабатываемое зубчатое колесо 1 свободно катить по шеввер-рейке 2 из положения А, то оно должно было бы переместиться в положение Б. Но так как зубчатое колесо и шеввер-рейка представляют собой как бы винтовую зубчатую пару со скрещивающимися осями, то колесо передвинется не в положение Б, а в положение В. В результате создается относительное проскальзывание зубьев обрабатываемого колеса и шеввер-рейки. При проскальзывании режущие кром-

ки шевера срезают тонкие стружки с боковых поверхностей зубьев шестерни. Скорость проскальзывания является при шевинговании скоростью резания. Шевингование производят со смазочно-охлаждающей жидкостью – сульфофрезолом или веретенным маслом.

Шлифование зубьев. Шлифование наружных и внутренних зубчатых венцов с прямыми и спиральными зубьями осуществляют методами копирования и обкатки. В основном шлифуют зубчатые колеса, подвергнутые закалке, цементации и закалке и азотированию.

Станки, работающие по методу копирования, производят шлифование кругом, профиль которого соответствует впадине зубьев, аналогично дисковой модульной фрезе. Круг заправляется тремя алмазами с использованием специального механизма – пантографа (рис. 10.35). Метод копирования обеспечивает высокую производительность по сравнению с методом обкатки, но имеет низкую точность.

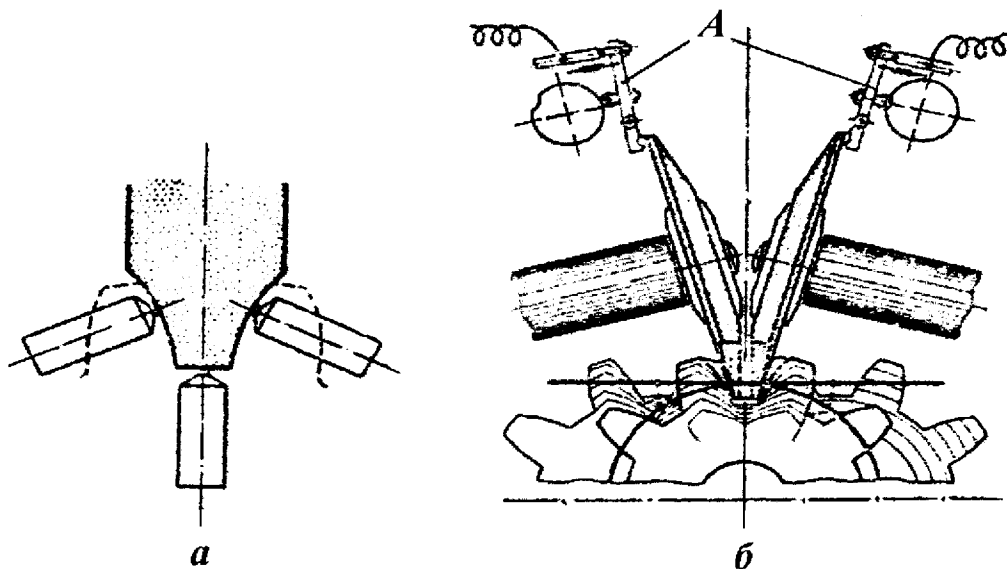


Рис. 10.35. Зубошлифование: *а* – заправка круга тремя алмазами; *б* – обработка двумя тарельчатыми кругами

При шлифовании зубчатых колес с большим числом зубьев по методу копирования имеет место значительный износ шлифовального круга. Если шлифование зубьев производить последовательно, то между первым и последним зубьями возникает значительная погрешность. Для предотвращения этого рекомендуется деление производить на кратное число зубьев. Например, если зубчатое колесо имеет

100 зубьев, то следует деление производить не на $1/z$, а на $5/z$, т. е. на $1/20$ или $10/z$, т. е. $1/10$ и т. д.

При этих условиях износ круга не будет вызывать появление больших погрешностей.

Основное время при зубошлифовании методом копирования определяется по формуле:

$$t_0 = \frac{2L \cdot i \cdot \alpha}{1000 \cdot V_{cm}} \cdot z \quad (\text{мин}), \quad (10.13)$$

где L – длина хода стола в мм; i – число проходов; α – коэффициент, учитывающий время деления, т. е. поворот на один зуб ($\alpha = 1,3 \div 1,5$); z – число зубьев зубчатого колеса; V_{cm} – скорость возвратно-поступательного движения стола в м/мин.

Длина хода стола L определяется по формуле

$$L = l_0 + \sqrt{h \cdot (D_k - h)} + 10 \quad (\text{мм}), \quad (10.14)$$

где l_0 – ширина зубчатого венца колеса в мм; h – высота зуба зубчатого колеса в мм; D – диаметр круга, мм.

На станках, работающих по методу обкатки, можно шлифовать прямые и спиральные зубья колес с наружным и внутренним зацеплением.

Существуют различные типы зубошлифовальных станков.

Например, шлифование высокоточных зубчатых колес производится на станках типа МААГ 5851, 5853, работающих двумя тарельчатыми кругами. Эти станки имеют устройство, компенсирующее износ кругов. Это устройство работает автоматически в процессе шлифования (рис. 10.35, б).

Зубчатые колеса устанавливаются на оправке, которая крепится в центрах бабок, расположенных на подвижной каретке 3 на столе станка. Стол станка совершает обратные-поступательные движения в продольном направлении (движение подачи) $V_{\text{прод}}$. Стальные ленты 2 закреплены одной стороной на ролике обкатки 1, а другой – к столу станка 6 (рис. 10.36).

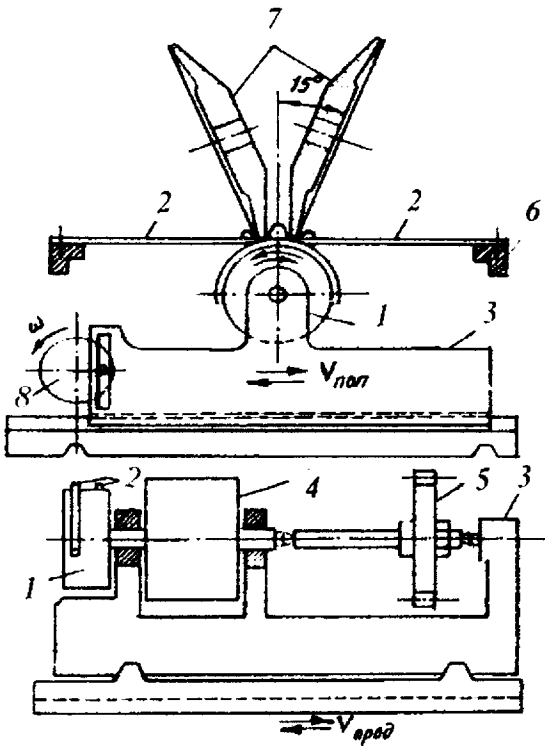


Рис. 10.36. Схема работы зубошлифовального станка 5851 МААГ

Каретка, на которой установлены делительный механизм 4, оправка с зубчатым колесом 5 и барабан обкатки 1, совершает быстрые возвратно-поступательные движения в поперечном направлении. Ленты 2, закрепленные на ролик обката 1, при наличии возвратно-поступательного движения каретки воспроизводят обкаточные движения зубчатого колеса по исходной режущей рейке шлифовальных кругов. Установка длины поперечного хода каретки 3 производится за счет радиуса кривошипа 8. Шлифовальные круги 7 устанавливаются на угол $\alpha_{ш}^{\circ}$, равный 15° или 0° .

По методу обкатки работают также станки типа НАЙЛС (5831).

Конусный круг (рис. 10.37, а) совершает медленную обкатку и быстрое возвратно-поступательное движение вдоль зуба.

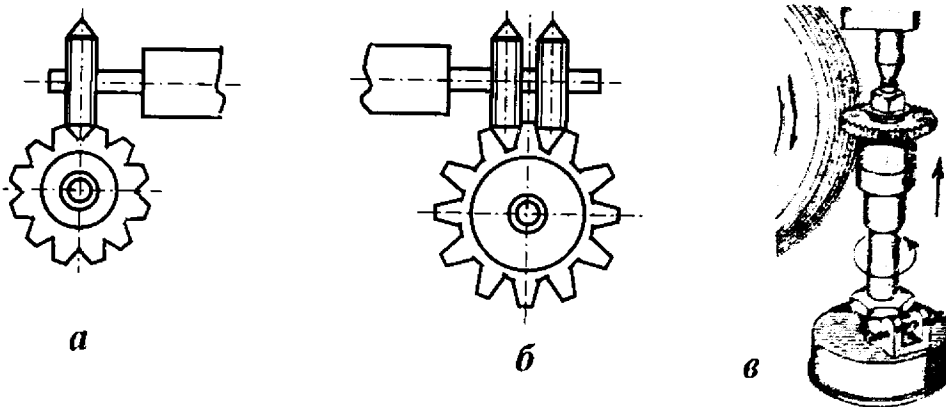


Рис. 10.37. Зубошлифование цилиндрических зубчатых колес: а – на станке 5851 одним конусным кругом; б – двумя абразивными кругами; в – на станке МАТРИКС червячным абразивным кругом

После обкатки одного зуба происходит деление на следующий зуб. Шлифование производится за два прохода. Между предварительным и окончательным проходами круг автоматически правится.

Станок обеспечивает получение колес 6 – 7-й степени точности. Для увеличения производительности на шпиндель станка 5831 устанавливают два конусных шлифовальных круга (рис. 10.37, б).

На машиностроительных заводах находят широкое применение станки с червячными абразивными кругами мод. 5830, 5832, выпускаемые фирмами «Рейсхауэр» (Швейцария) и «Мартикс» (Англия) (рис. 10.37, в). Правка червячного круга с прямолинейным профилем осуществляется алмазами с помощью специального механизма. Станки этой группы имеют высокую производительность, обеспечивая получение зубчатых колес 5–6-й степени точности и 8 –9-го класса шероховатости.

Зубохонингование. Процесс зубохонингования осуществляется на станках без жесткой кинематической связи и заключается в совместной обкатке обрабатываемого зубчатого колеса и инструмента.

Инструмент – хон, имеющий вид зубчатого колеса, изготовленного из пластической массы, в составе которой содержится абразивный порошок. Обкатка сопровождается относительным проскальзыванием при наличии радиального давления. Оси изделия и инструмента устанавливаются под некоторым углом скрещивания $15 - 20^\circ$. При зубохонинговании обрабатываемое колесо совершает вдоль своей оси колебательные движения с частотами 17 – 220 Гц.

Процесс зубохонингования применяется для обработки зубчатых колес с модулем $m = 2 \div 6$ мм, $d = 30 - 500$ мм шириной зубчатого венца, равного 150 мм. После зубохонингования высота шероховатости поверхности уменьшается на 2 – 3 класса по сравнению с исходной.

Зубохонингование – высокопроизводительный метод обработки, но он имеет ограниченную величину снимаемого припуска – не более 0,05 мм. С увеличением снимаемого припуска возрастает искажение профиля эвольвенты: возникает подрез ножки и фланкирование головки зубьев колеса. Искажение профиля эвольвенты связано с неравномерным проскальзыванием по высоте зуба сопряженных профилей: зубчатого колеса и хона.

Хонингование производят при постоянном давлении между инструментом и колесом с обильной подачей СОЖ.

Притирка зубьев зубчатых колес. Притирка применяется для окончательной обработки закаленных зубчатых колес. Процесс притирки заключается в том, что обрабатываемое зубчатое колесо вво-

дится в зацепление с чугунной шестерней – притиром, смазанным пастой, состоящей из смеси мелкого абразивного порошка с маслом. Зубчатое колесо, помимо вращательного движения, имеет возвратно-поступательное перемещение вдоль зуба.

На боковые поверхности зубьев во время притирки создается давление гидравлическим тормозом, действующим на шпиндели притира. Притирка обеспечивает поверхность высокого качества, она сглаживает шероховатости и придает зеркальный блеск поверхности, значительно уменьшая шум и увеличивая плавность работы зубчатых колес.

При условии правильного изготовления зубчатого колеса, т. е. без существенных погрешностей, притирка обеспечивает более высокое качество, чем операция шлифования. Но если зубчатое колесо имеет после нарезания и термической обработки значительные погрешности, то необходимо сначала произвести зубошлифование, а затем притирку.

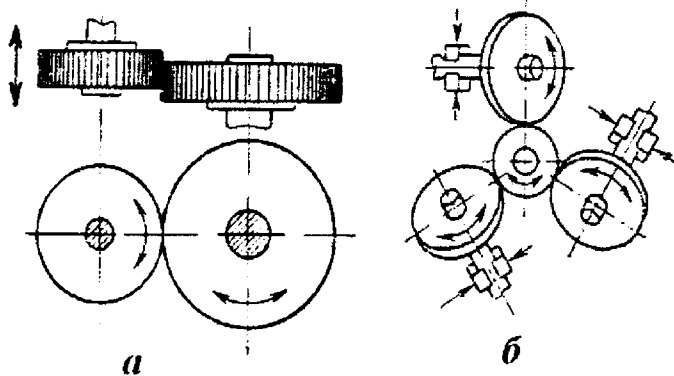


Рис. 10.38. Схемы притирки зубьев цилиндрических зубчатых колес: *а* – с параллельными осями притиров; *б* – со скрещивающимися осями притиров

Притирочные станки изготавливаются с параллельными (рис.10.38, *а*) и со скрещивающимися (рис.10.38, *б*) осями притиров. Режущими элементами при зубопритирке служат абразивные зерна, поступающие в зону обработки в виде смеси с жидкими компонентами. Абразивные зерна, находящиеся в свободном состоянии, обкалываются с проскальзыванием по эвольвентным по-

верхностям зубьев, часть из них внедряются в поверхность инструмента, закрепляются в ней и осуществляют процесс микрорезания выступающими вершинами. Зубопритирка получила широкое распространение для отделки закрытых внешних и внутренних зубчатых венцов из цементируемых и, особенно, из азотируемых сталей. При удалении малых припусков процесс зубопритирки является более производительным по сравнению с зубошлифованием.

10.4.6. Влияние степени точности зубчатых колес на трудоемкость их изготовления

С повышением степени точности зубчатых колес возрастает число операций механической обработки, а следовательно, и себестоимость их изготовления. Затраты времени на механическую обработку зубчатых колес одинаковых типоразмеров ($m = 5$, $z = 40$), но имеющих различную степень точности, следующие:

Степень точности	3	4	5	6	7	8
Затраты времени на обработку, мин	210	170	140	110	60	55

Зубчатые колеса 7-й и 8-й степеней точности не подвергаются зубошлифованию. Точность зубчатого венца здесь формируется на операциях зубофрезерования или зубодолбления. Технологические процессы зубчатых колес 6-й и 7-й степеней точности в рассматриваемом варианте отличаются только одной операцией зубошлифования, а время, затрачиваемое на механическую обработку, отличается в 2 раза (от 60 до 110 мин). С повышением степени точности вводятся дополнительные операции, например: восстановление установочных баз, зубошевингование, зубохонингование и т. д. Приведенные данные наглядно показывают, что отделочные операции зубчатых колес являются наиболее трудоемкими.

10.5. ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Детали из жаропрочных, титановых сплавов и других труднообрабатываемых материалов обрабатываются физико-химическими методами.

В практике нашли применение электроэрозионный, электрохимический, ультразвуковой, электроннолучевой и светолучевой методы обработки. При этих способах обработки съем металла и формирование поверхности детали происходит под воздействием электрической, световой и химической энергии без преобразования ее в механическую, тепловую или другие виды энергии вне обрабатываемой зоны.

10.5.1. Электроискровая обработка

Электроискровая обработка основана на использовании электрической энергии путем направленного воздействия импульсных электрических разрядов на обрабатываемую поверхность. Это явление называется электрической эрозией. При этом явлении происходит плавление, испарение и гидродинамический выброс расплавленного металла. Электроискровая обработка осуществляется в жидкой среде-диэлектрике – масле или керосине. В результате электрического разряда в эрозионном промежутке между двумя электродами (деталью и инструментом) в локальном участке возникает температура более 3000°С. Под воздействием этой температуры происходит гидродинамический выброс расплавленного металла с образованием кратера. Электроискровая обработка применяется для обработки сложных фасонных деталей, например, лопаток из жаропрочных титановых сплавов и вырубных штампов из твердых сплавов.

Для обработки лопаток из жаропрочных сплавов рекомендуется применять следующие режимы: напряжение 20 – 30В, сила тока 30 – 50А. Производительность электроэрозионной обработки зависит от теплофизических параметров обрабатываемого материала, свойств межэлектродной среды, силы тока, напряжения и частоты импульсов.

Производительность Q определяется количеством металла, снятого с обрабатываемой поверхности в единицу времени и выражается в мм³ / мин.

$$Q = CAf,$$

где C – коэффициент, зависящий от теплофизических констант обрабатываемого металла и электрода; A – энергия импульсов; f – частота импульсов.

Наилучшей обрабатываемостью обладает магний, алюминий, наихудшей – твердые сплавы, молибден и вольфрам. Некоторые схемы, иллюстрирующие возможности электроискровой обработки, представлены на рис. 10.39.

Деталь 3 помещается в ванну, заполненную диэлектрической жидкостью (керосином или индустриальным маслом) 2 и подключается к положительному полюсу, а электрод, имеющий требуемую профильную форму прожигаемого отверстия – к отрицательному.

В качестве материала для изготовления профильных инструментальных электродов обычно используются: пористая медь, МПГ-7, МП-75, МП-85, вольфрам ВА-3, медный сплав МЦ4, латунь ЛС59, серый чугун, алюминий и его сплавы Д1, АК7, АЛ3, АЛ5.

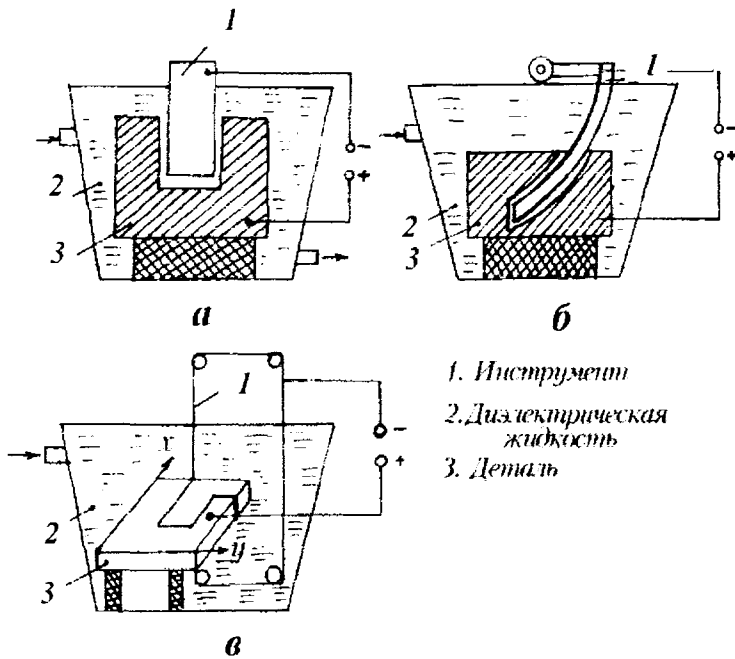


Рис. 10.39. Электроискровая обработка

С помощью поворачивающегося дугообразного электрода 1 (рис. 10.39, б) можно обрабатывать криволинейные отверстия. При вырезке в пластинах отверстий сложной конфигурации применяют проволочные электроды (рис.10.39,в). Проволочный электрод, к которому подключен положительный полюс, медленно перемещается по замкнутому контуру. Деталь со столом по определенной программе получает требуемые перемещения по координатам x и y .

10.5.2. Анодно-механическая обработка

Анодно-механический метод обработки осуществляется в результате электрохимического, теплового и механического воздействия на обрабатываемую деталь. Процесс анодно-механической обработки производится в электролите, состав которого зависит от марки обрабатываемого материала. Режущий инструмент – вращающийся диск из листовой стали или меди, толщиной 1,0 – 1,5 мм, – выполняет роль катода, а обрабатываемая деталь является анодом. Электролит подается в зону резания. Электрический режим выбирают в зависимости от диаметра разрезаемой заготовки. Например, при размере прутка диаметром 20 мм применяется следующий режим: напряжение 20 – 28 В, сила тока 40,0 – 45,0 А, скорость вращения металлического диска диаметром 400 – 700 мм 15–25 м/с, давление круга на заготовку 0,5 – 2,0 МПа, расход электролита 8 – 10 л/мин.

На станках для анодно-механической заточки резцов все операции (черновая, получистовая, чистовая) производятся с одной их установки, изменяется лишь электрический режим путем включения дополнительных сопротивлений.

В табл. 10.4 приведены режимы для заточки резцов из твердого сплава.

Т а б л и ц а 10.4

Операция	Напряжение , В	Сила тока,А	Сопротив- ление цепи	Производитель- ность,мм/мин
Черновое шлифование	18–20	50–70	0,10–0,15	1,0–1,5
Получистовое шлифование	15–17	13–15	0,5–0,7	0,1–0,2
Чистовое шлифование	8–12	4–8	2,0–2,25	0,03–0,06

Заточка инструментов производится на специальных заточных станках 3623, 3Е6249, 3672, инструмент представляет собой диск диаметром 150 – 200 мм при частоте вращения 1250 – 1440 об/мин.

10.5.3. Электрохимическая размерная обработка

Электрохимическая размерная обработка основана на явлении анодного растворения металла при прохождении электрического тока через электролит. Электролиты – это вещества, обладающие ионной проводимостью. При электрохимической обработке в качестве электролитов обычно применяют водные растворы солей, кислот, оснований (щелочей). Анодное растворение сопровождается образованием на обрабатываемой поверхности пассивирующей пленки (гидрата окиси металла). Эта пленка из-за плохой проводимости тока замедляет протекание процесса, а в ряде случаев полностью приостанавливает электрохимическое растравливание металла. Для нормального протекания анодного растворения пассивирующую пленку необходимо удалять.

При алмазном хонинговании и полировании продукты гидролиза удаляются с поверхности механическим путем – абразивными зернами. Например, при электрохимической размерной обработке пера

лопаток продукты анодного растворения удаляются потоком электролита.

Принцип электрохимической размерной обработки в проточном электролите заключается в том, что обрабатываемая деталь устанавливается относительно электродов с зазором, через который прокачивают с большой скоростью электролит. При этом деталь является анодом, а электрод-инструмент – катодом. При прохождении электрического тока по цепи катод – инструмент – анод – заготовка, последняя под действием тока растворяется, принимая форму электрода инструмента. Продукты анодного растворения непрерывно удаляются с поверхности анода-заготовки потоком прокачиваемого электролита и осаждаются в баке в виде шлама. Электроды-инструменты при электрохимической обработке практически не изнашиваются, сохраняя свою первоначальную форму и служат в качестве токопроводящих элементов. В зависимости от геометрических и электрохимических параметров межэлектродный зазор изменяется от 0,3 до 0,5 мм.

Для регулирования процесса электрохимического растворения требуется поддерживать стабильными гидравлические, механические и электрические режимы. К гидравлическим режимам относят скорость протока электролита в зазоре между электродами. Постоянство скорости обеспечивается изменением давления электролита в трубопроводах. К механическим режимам относят поперечную подачу, обеспечивающую постоянный зазор между электродами. К электрическим режимам относят стабилизацию напряжения и плотности тока. При выборе электролита надо учитывать электропроводность, безопасность в работе и стоимость. Электролиты не должны содержать вредных для здоровья людей веществ и не должны поражать металлические части станка коррозией.

С учетом этих требований рекомендуется применять для сталей водные растворы поваренной соли NaCl , для титановых сплавов – раствор азотнокислого натрия NaNO_3 , для жаропрочных сталей – раствор сернокислого натрия NaSO_4 . Концентрация растворов колеблется от 10 до 15% (наилучшая 8 – 12%), плотность тока 20 – 30 A/cm^2 , скорость протока электролита 20 – 30 м/с, температура электролита 20 – 30°C.

Пропорционально величине зазора изменяется съём металла на отдельных участках профиля пера обрабатываемых лопаток. Чем больше зазор, тем меньше съём металла и наоборот. Следовательно,

на выступающих участках профиля пера лопатки съём металла будет протекать более интенсивно и с течением времени произойдет выравнивание зазора и съём металла будет равномерный на всей поверхности лопатки.

Для ускорения процесса выравнивания межэлектродного зазора рекомендуется применять электролиты, насыщенные воздухом. При пропускании газированного электролита через межэлектродный зазор воздушные пузырьки будут концентрироваться в зонах, имеющих максимальный зазор, т. е. в зонах, имеющих минимальное сопротивление. При этих условиях концентрация воздуха в электролите будет неравномерна. В зонах с увеличенной концентрацией воздуха процесс электрохимического растворения будет замедляться, и, наоборот, в зонах с минимальным межэлектродным зазором (на выступах) съём металла будет протекать более интенсивно. При этих условиях за более короткий промежуток времени выравнивается неравномерность снимаемого припуска за счет более интенсивного удаления неровностей с профиля лопатки.

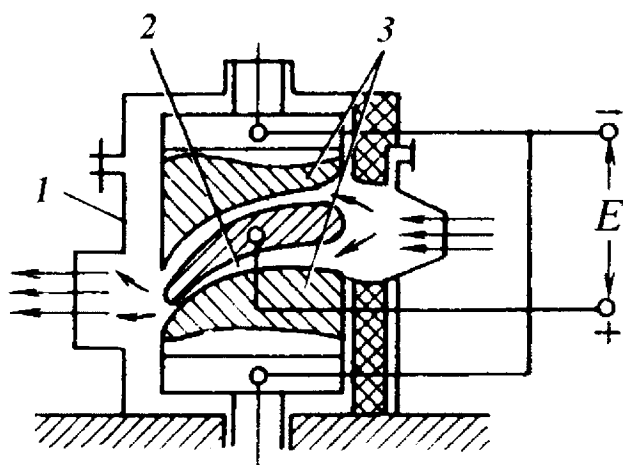


Рис. 10.40. Схема электрохимической обработки пера лопатки ГТД:

- 1 — рабочая камера; 2 — деталь;
- 3 — электрод-инструмент

На рис. 10.40 представлена схема электрохимической обработки пера газотурбинной лопатки. Продолжительность рабочего цикла обработки одной лопатки электрохимическим методом составляет 15 – 20 мин.

Точность профиля пера штампованной заготовки из стали ЭИ 435 после электрохимической обработки колеблется в пределах 0,1 – 0,2 мм.

При электрохимической обработке крупногабаритных лопаток предложенная схема обра-

ботки не может быть реализована из-за чрезмерно большой площади электродов. При этих условиях обеспечить требуемую плотность тока $20 - 30 \text{ А/см}^2$ практически очень сложно. Поэтому обработку крупногабаритных деталей осуществляют по принципу бегущей волны движущимся электрическим полем. Для этой цели электрод изготавливается в виде отдельных секций, изолированных друг от друга. На каж-

дую секцию подаются кратковременные импульсы за счет выборочной коммутации. В первую очередь подключаются те секции, которые имеют минимальный межэлектродный зазор.

На рис. 10.41 представлена схема электрохимической обработки секционными электродами. Удаление припуска с заготовок осуществляется по программе.

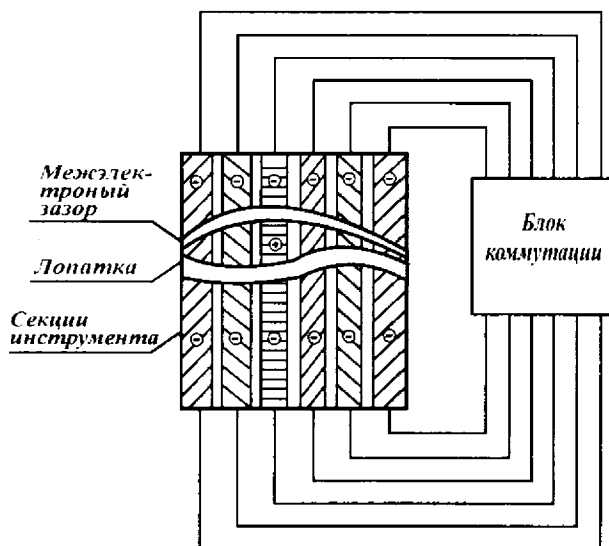


Рис. 10.41. Электрохимическая обработка крупногабаритных лопаток секционными электродами

Предварительный обмер колебаний припуска на заготовке лопатки определяет очередность коммутации секций с целью выравнивания неровностей. После выравнивания неровностей обработка осуществляется с помощью бегущей волны. Электрохимический метод применяется также для обработки отверстий в деталях из твердых сплавов.

В качестве электрода используют трубки, изготовленные из титановых или нержавеющей сплавов с изоляционным многослойным покрытием. Изоляционное покрытие электродов осуществляется с помощью лаков или эмалей, которые под воздействием применяемых электролитов не подвергаются разрушению.

10.5.4. Электроабразивная обработка

При электроабразивной обработке инструментом-электродом является шлифовальный токопроводящий круг. Зазор между деталью – анодом и шлифовальным кругом–катодом равен высоте наиболее выступающих зерен из связки. В этот зазор подается электролит. Продукты анодного растворения материала заготовки удаляются абразивными зернами, выступающими из связки. Электроабразивная обработка применяется при плоском и круглом шлифовании твердых сплавов, быстрорежущих конструкционных и жаропрочных сталей и сплавов, при шлифовании профильных пазов, шлицевых поверхностей, заточке режущих инструментов. Процесс протекает при значи-

тельно меньшей теплонапряженности по сравнению с обычным шлифованием.

В качестве режущего инструмента применяются абразивные и алмазные круги на токопроводящих связках М1, М5, СЭШ-1, СЭШ-2, основными компонентами в которых являются медь, цинк, алюминий. При электроабразивном шлифовании жаропрочных и конструкционных сталей применяют белый электрокорунд, для титановых – зеленый карбид кремния. В качестве токопроводящих электролитов, обеспечивающих требуемое качество поверхности, точность и производительность, а также не вызывающих коррозию на незащищенных частях оборудования, применяются растворы нейтральных солей с добавками ингибиторов для придания им антикоррозионных свойств. В качестве ингибиторов используют двуххромовокислый калий, бензойнокислый натрий, триэтаноламин.

В табл.10.5 приведены некоторые составы электролитов, применяемых для электроабразивной обработки [52].

Т а б л и ц а 10.5

Обрабатываемый материал	Состав электролита	Массовая доля компонента, %	Съем, мм ³ /мин	Ra, мкм
Стали углеродистые	натрий азотно-кислый	25	4560–5360	1,25–0,32
	хлористый натрий	10–25		
	гексаметафосфат натрия	0,04–0,4		
	силикат натрия	0,3–0,5		
	остальное вода			
Сплавы титановые	хлористый натрий	3–15	870–3000	2,5–1,25
	бромистый калий	3	1250–3500	
	остальное вода			
Твердые сплавы	хлористый натрий	8–10		0,63–0,32
	остальное вода			

Электроабразивное шлифование твердых сплавов осуществляется на следующих режимах: скорость круга 15 – 30 м/с, напряжение 15 – 20 В, плотность тока 1 – 7 А/см², давление круга 15 – 20 мПа [53].

10.5.5. Ультразвуковая обработка

Ультразвуковая обработка применяется для изготовления деталей из хрупких и твердых материалов (стекла, керамики, фарфора, твердых сплавов). Метод основан на использовании ультразвуковых колебаний инструмента, осуществляемых с помощью магнитострикционных вибраторов.

Магнитострикционный эффект основан на способности некоторых металлов изменять свои геометрические размеры в магнитном поле. Такими свойствами обладает никель. Магнитострикционные вибраторы позволяют получить частоты колебаний порядка 20 – 30 кГц. Иногда требуется получить колебания с частотами порядка 100 – 150 кГц. Для получения таких колебаний используют пьезоэлектрический эффект, основанный на способности некоторых материалов изменять свои геометрические размеры под воздействием электрического поля. Это свойство наиболее выражено у кристаллов кварца и титанита бария.

При наличии ультразвуковых колебаний в жидких средах возникает кавитация – образование в жидкости небольших кавитационных пузырьков. Эти пузырьки неустойчивы. При их разрушении возникают силы, сопровождающиеся гидравлическим ударом. Если вблизи этих пузырьков будет находиться твердое тело, то под воздействием гидравлического удара оно будет подвергнуто разрушению. На поверхности образуются мелкие раковины.

Если в зону обработки непрерывно подавать абразивную суспензию из мельчайших частиц алмазной пыли, карбида бора или карбида кремния, то под воздействием высокочастотных колебаний инструмента магнитостриктора 3 (рис. 10.42) абразивные зерна с большой скоростью будут ударяться об обрабатываемую поверхность, разрушая ее. На резонансной высоте амплитуды колебаний магнитострикционных вибраторов составляют не более 5 – 10 мкм. Для повышения эффективности ультразвуковой обработки необходимо, чтобы торец стержня инструмента вибрировал с амплитудой 0,03–0,1 мм.

Для достижения этой цели применяют усилители колебаний.

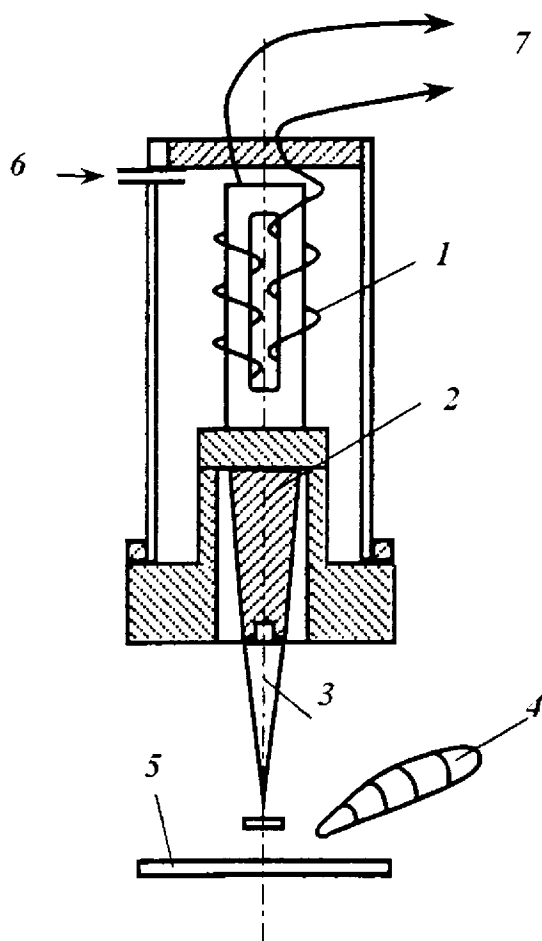


Рис. 10.42. Схема ультразвуковой обработки: 1 – магнитоstrictionный вибратор; 2 – концентратор; 3 – инструмент; 4 – сопло для подачи абразивной суспензии; 5 – деталь; 6 – вода для охлаждения вибратора; 7 – выходные концы обмотки вибратора для подключения к генератору высокой частоты

Конический стержень (концентратор) 3 изготавливается из высокопрочного металла, обладающего высокими антифрикционными свойствами и износостойкостью от разрушающего воздействия абразива. Производительность процесса обработки зависит от свойств обрабатываемого материала, амплитуды и частоты колебаний инструмента и зернистости абразивного материала.

На машиностроительных заводах ультразвуковой метод применяется для обработки отверстий в деталях из закаленных сталей, жаропрочных и титановых сплавов, карбида вольфрама и молибдена, стекла, графита, керамики и т. п. Точность обработки зависит от величины зерна абразива, она может быть получена в пределах 0,005 – 0,04 мм.

Ультразвуковую обработку часто применяют в сочетании с электроискровой. Предварительная обработка производится электроискровой, а чистовая – ультразвуковой.

ГЛАВА 11

ТИПОВЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ

11.1. ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КОРПУСНЫХ ДЕТАЛЕЙ

К корпусным деталям относятся детали коробчатой формы. Отверстия корпусных деталей разделяются на точные (которые служат опорами для валов и подшипников) и вспомогательные, предназначенные для крепления деталей и смазки. Диаметры основных отверстий под посадку подшипников изготавливаются по пятому качеству точности с шероховатостью $Ra = 0,08 \div 0,14$ мкм. Несоосность отверстий допускается в пределах половины допуска на диаметр меньшего отверстия, а их конусность и овальность не более $0,3 \div 0,5$ поля допуска на соответствующий размер. Допуски на межосевое расстояние для цилиндрических зубчатых передач с межцентровым расстоянием 50 – 800 мм при различных видах сопряжений изменяются от ± 25 до 150 мкм. Непараллельность осей отверстий изменяется в пределах 0,02 – 0,05 мм на длине 100 мм длины. Привалочные поверхности обрабатываются с шероховатостью поверхности $Ra = 0,2 \div 0,8$. Неперпендикулярность торцевых поверхностей к осям отверстий допускается в пределах 0,01 – 0,05 мм на 100 мм радиуса. Шероховатость поверхностей отверстий $Ra = 1,6 \div 3,2$ мкм.

Для изготовления заготовок корпусных деталей часто применяют серый чугун, реже – стальное литье. Перед обработкой резанием внутренние и наружные поверхности корпусных деталей окрашивают. Трудоемкость изготовления корпусных деталей в значительной степени зависит от технологичности конструкции. Для снижения трудоемкости изготовления корпусных деталей необходимо при проектировании обеспечить следующие технологические требования: корпусная деталь должна быть достаточно жесткой, чтобы в процессе обработки не возникали деформации.

Базовые поверхности корпусной детали должны иметь достаточную протяженность и обеспечивать обработку от одной базы. Отверстия корпусной детали должны иметь по возможности простую геометрическую форму, без кольцевых канавок и фасок. Желательно, чтобы диаметры отверстий, расположенных на одной оси, уменьшались от наружных стенок к перегородкам. Отверстия, оси которых расположены под углом к стенке детали, нежелательны, так как это вызывает при обработке увод сверл и даже их поломку.

Крепежные отверстия должны быть стандартными. Во всех видах производств последовательность обработки корпусных деталей принципиально одинакова и заключается в обработке наружных поверхностей (базовых) и основных отверстий.

Обработка наружных отверстий и основных отверстий производится за две операции: черновую и чистовую. Крепежные отверстия обрабатываются за одну операцию. В единичном производстве заготовки корпусных деталей обрабатываются по разметке или с применением УСП на универсальных станках. В условиях серийного производства обработку заготовок корпусных деталей осуществляют с применением приспособлений, что полностью исключает разметку заготовок и их выверку при установке на станок.

Корпусные детали базируются по поверхности и двум точным установочным технологическим отверстиям, расположенным на максимально возможном расстоянии друг от друга по диагонали.

В единичном и мелкосерийном производствах основные отверстия в заготовках корпусных деталей обрабатывают на горизонтально-расточных (рис. 11.1, *а*), карусельных и радиально-сверлильных станках (рис. 11.1, *б*) с программным управлением. Расточку производят двумя способами: с установкой резца на консольной оправке и растачиванием с помощью бортштанг.

Консольная обработка проще, но обеспечивает меньшую точность. Поэтому при обработке длинных отверстий вместо консольного растачивания применяют растачивание с помощью бортштанг, имеющих дополнительную опору в люнетной стойке.

Координатно-расточные станки оснащены отсчетно-измерительными системами (оптические с экранной оптикой). Точность установки координат на этих станках 0,002 мм для станков малых размеров, 0,003 – 0,004 мм для станков средних размеров и 0,006 – 0,008 мм для крупногабаритных станков. В координатно-расточных стан-

ках повышенной точности (мастер станках) точность межцентровых расстояний при обработке деталей достигается 0,001 мм.

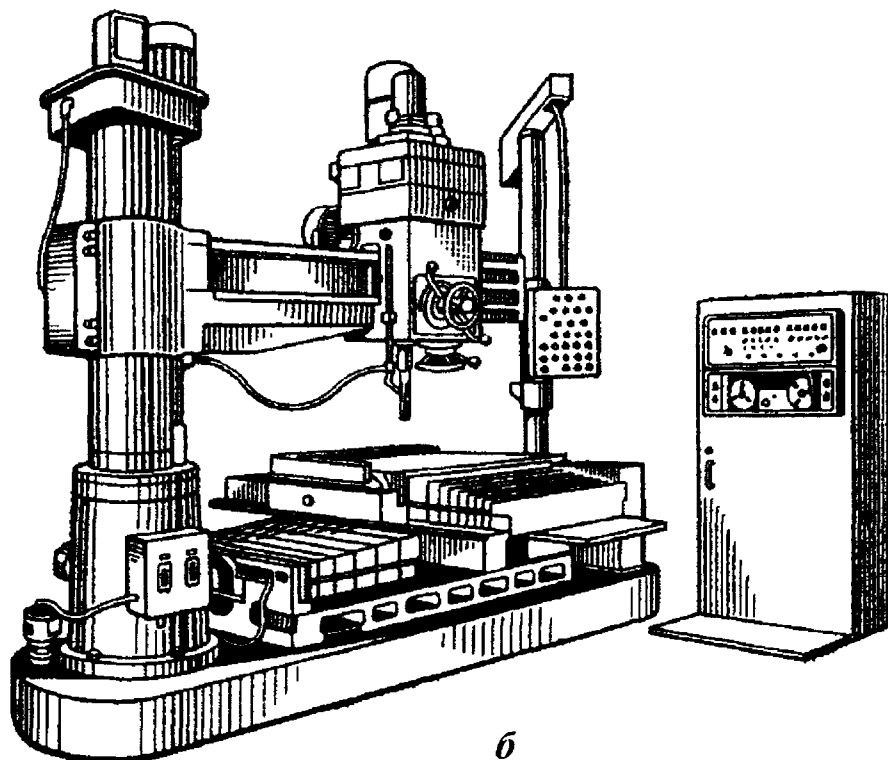
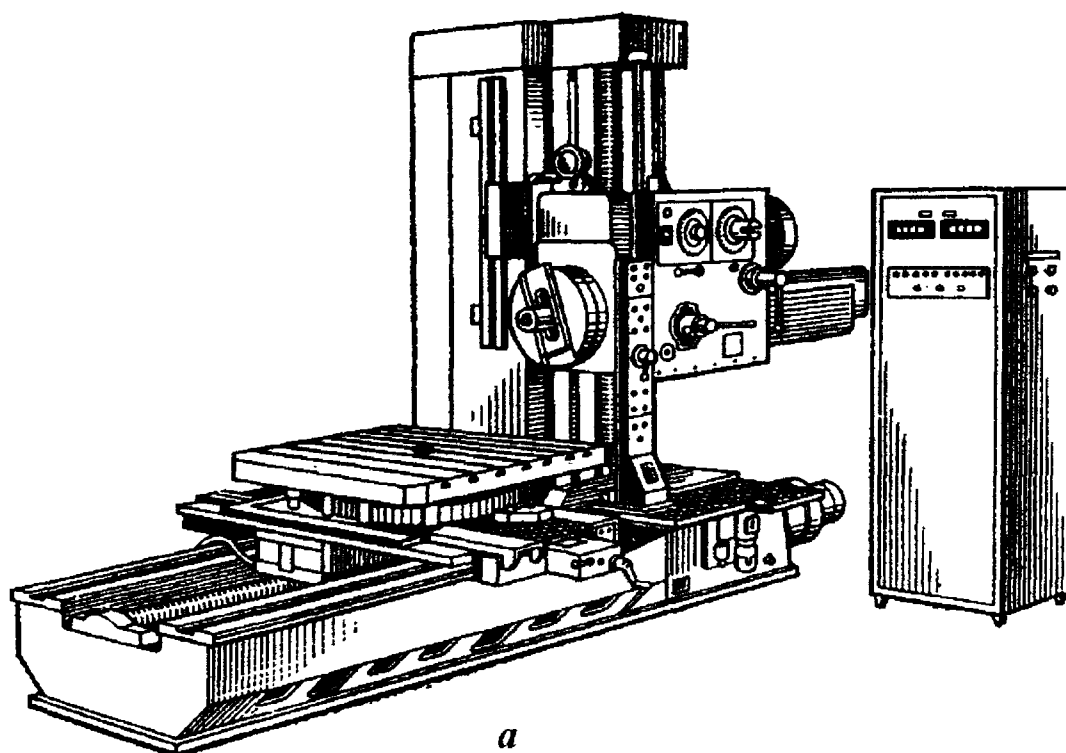


Рис. 11.1. Станки с программным управлением для обработки корпусов:
а – горизонтально-расточной станок; *б* – радиально-сверлильный

В серийном производстве для растачивания отверстий применяют специальные приспособления. Направление инструмента обеспечивается кондукторными втулками. Бортштанга соединяется со шпинделем станка гибкой связью. При данной схеме расточки станок сообщает бортштанге не только вращение, но и осевое перемещение. Точность координат обеспечивается приспособлением.

В массовом и крупносерийном производствах растачивание отверстий в корпусных деталях осуществляется на агрегатных станках. Схема черного растачивания отверстий корпуса коробки скоростей представлена на рис. 11.2. На агрегатном двухстороннем станке производится зенкерование и сверление всех отверстий.

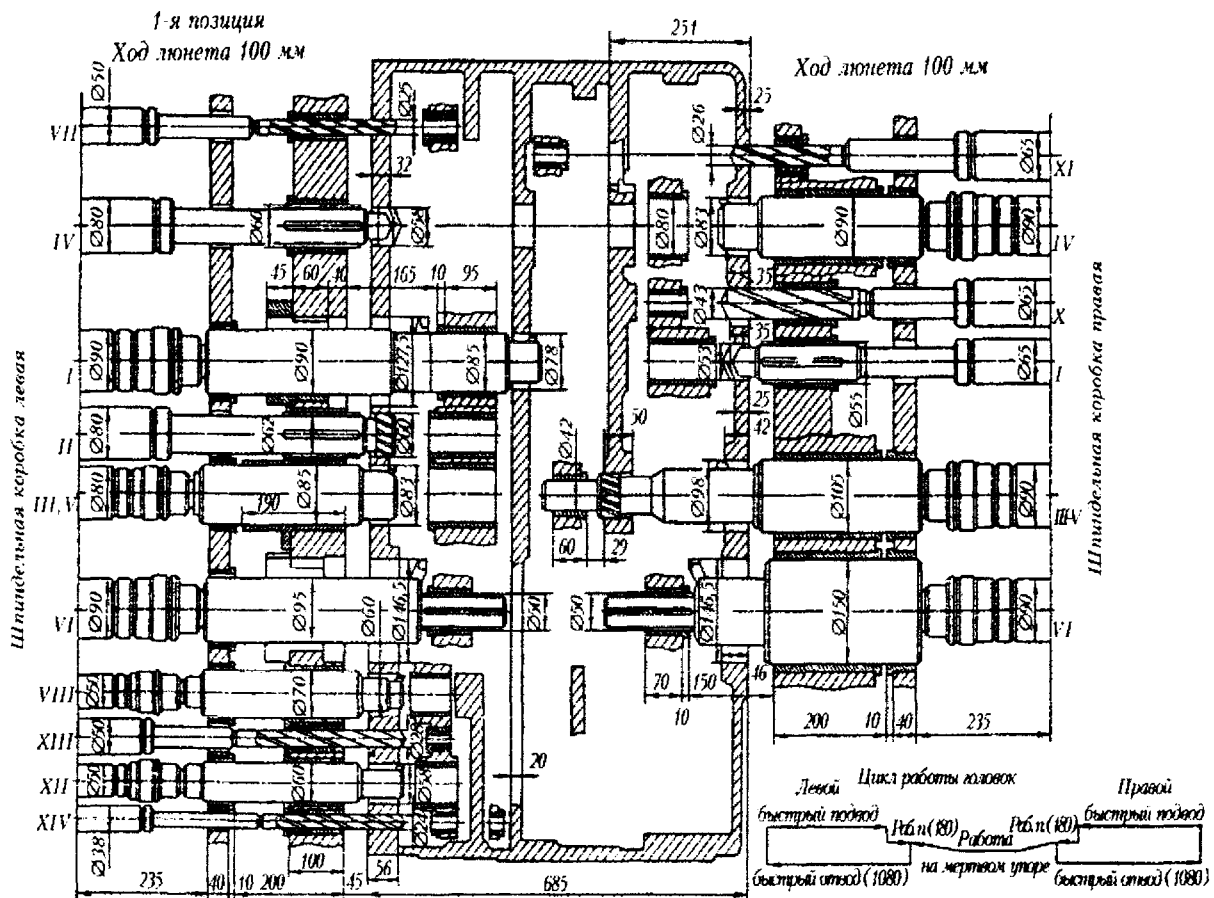
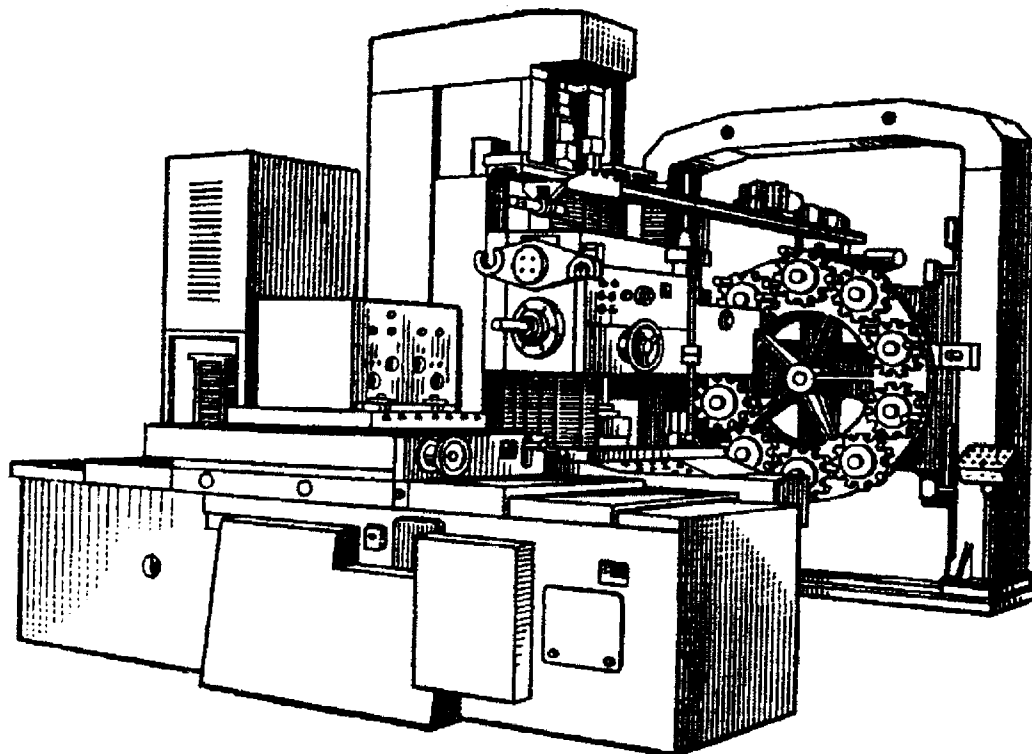


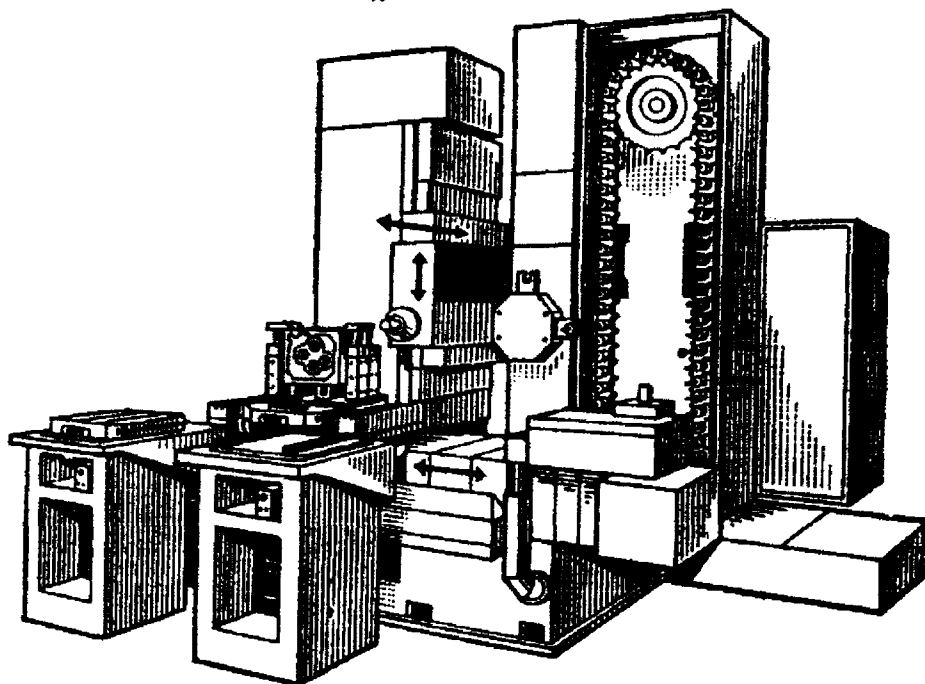
Рис. 11.2. Схема черного растачивания корпуса коробки скоростей

После окончания рабочего хода силовые головки возвращаются в исходное положение, а заготовка из рабочей позиции перемещается в загрузочную. Во второй позиции (загрузочной) обработанную заготовку снимают и устанавливают новую. При этих условиях обработки

вспомогательное время на установку и снятие детали совмещается с машинным. На рис. 11.3 приведены внешние виды станков с программным управлением с автоматической сменой инструмента с одним (рис. 11.3, а) и двумя (рис. 11.3, б) столами.



а



б

Рис. 11.3. Станки с программным управлением с автоматической сменой инструментов: *а* – с одним столом; *б* – с двумя столами

Быстродействующие устройства для смены инструментов (рис. 11.4) позволяют использовать при обработке сложных корпусных деталей наборы разнообразных инструментов. Наличие двух столов позволяет совместить время на установку и снятие детали с машинным временем. Пока на одном станке производится обработка детали, на другом производится смена обрабатываемой детали. Несмотря на высокую стоимость станков с ЧПУ, обработка сложных корпусных деталей является эффективной благодаря резкому сокращению трудоемкости и длительности производственного цикла.

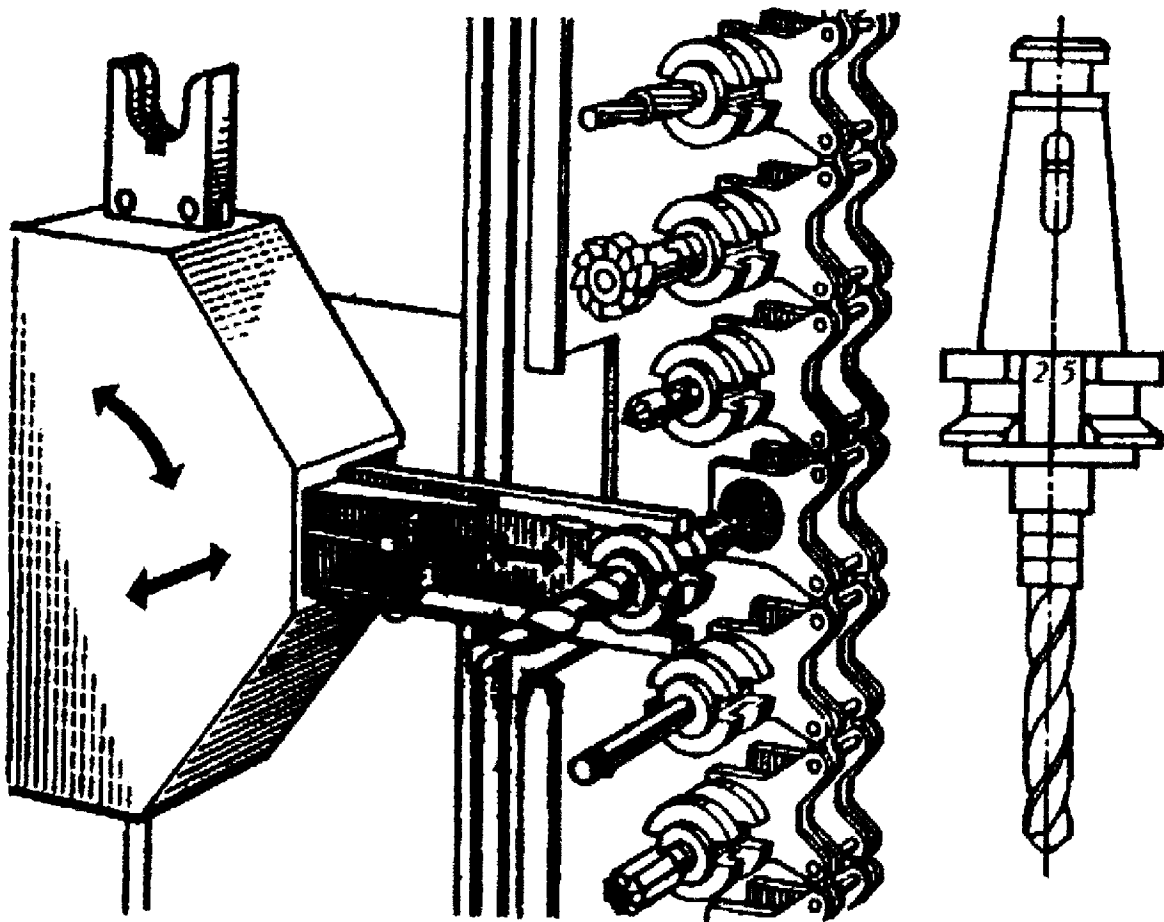


Рис. 11.4. Инструменты, используемые при обработке корпусных деталей

На машиностроительных заводах для большей эффективности создают специализированные и автоматизированные участки. Особенностью автоматизированных участков является централизованное управление группой станков и транспортными устройствами, а также диспетчеризация и учет заготовок обработанных деталей с помощью ЭВМ.

Межоперационные заделы заготовок располагают на специальных стеллажах, обслуживаемых автоматическими штабелерами по командам от ЭВМ. Перемещение заготовок и деталей от стеллажа и обратно выполняют специальные автоматически перемещающиеся тележки. Внедрение таких автоматизированных участков на заводах мелкосерийного производства позволяет во много раз повысить производительность труда, сократить производственный цикл обработки, повысить культуру производства.

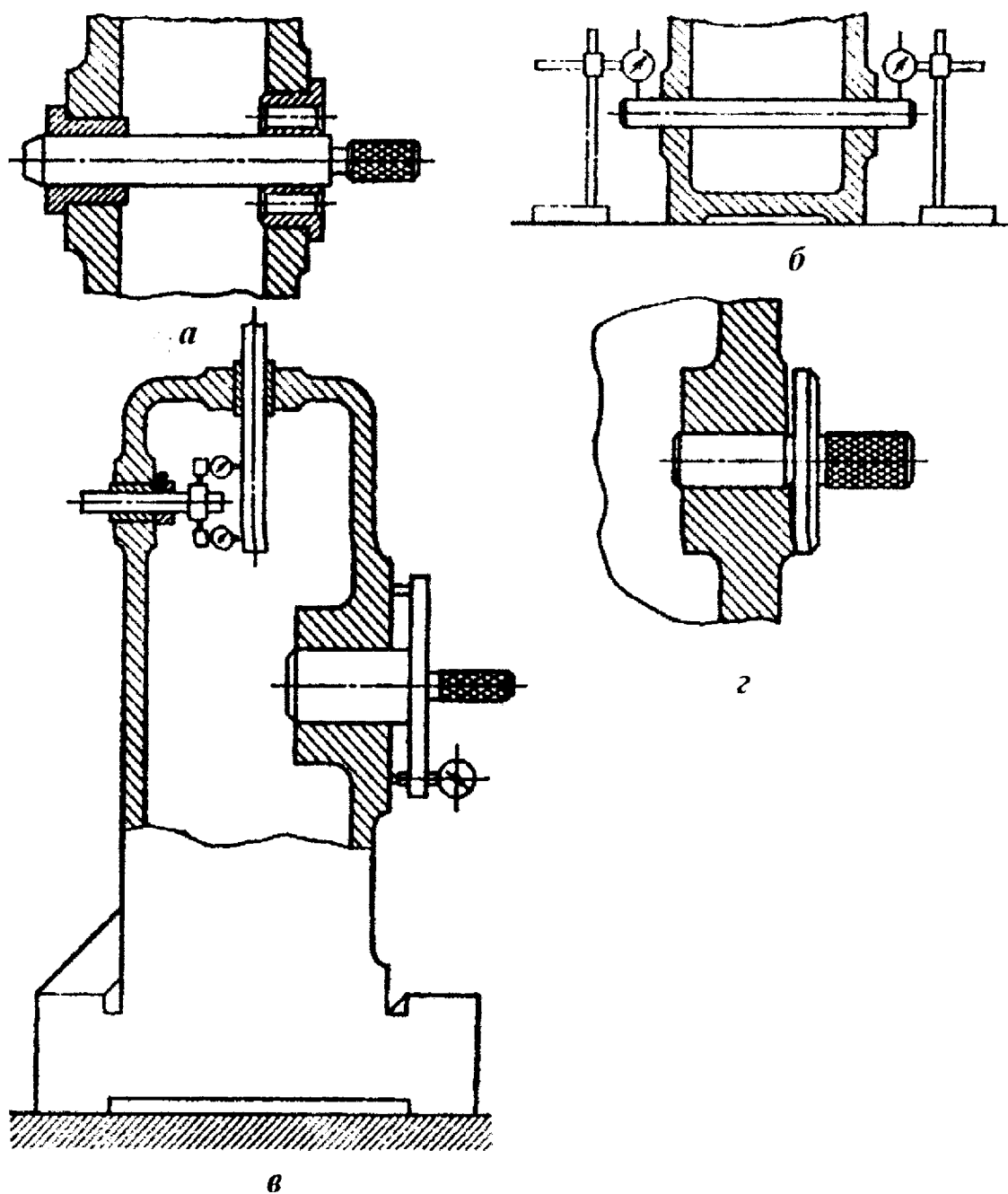


Рис. 11.5. Схемы контроля корпусных деталей

После завершения обработки в корпусных деталях проверяют:

1. Прямолинейность и правильность расположения основных (базовых) поверхностей.

2. Размеры и форму основных отверстий.

3. Соосность осей отверстий.

4. Межосевые расстояния, параллельность и перекос осей.

5. Перпендикулярность осей основных отверстий к торцам.

Прямолинейность проверяют уровнем или индикатором. Диаметры измеряют штангенциркулями, микрометрами, предельными калибрами. Соосность контролируют гладкими или ступенчатыми контрольными оправками. При проверке соосности больших диаметров контрольные оправки помещают во втулки (рис. 11.5, а).

Межосевые расстояния и непараллельность осей проверяют микрометром, индикаторным прибором или штангенциркулем.

Правильность расположения осей отверстий относительно основной поверхности, а также ее параллельность можно проверять штангенрейсмусом с точностью 0,02 мм и индикатором (рис. 11.5, б) с точностью 0,01 мм.

Неперпендикулярность осей отверстий проверяют с помощью оправки с индикатором (рис. 11.5, в) и калибром. Проверку неперпендикулярности торцевой поверхности относительно оси отверстия осуществляют с помощью индикатора и специального калибра (рис. 11.5, г).

11.1.1. Обработка заготовок деталей типа станин

Станины, колонны, стойки, столы и другие детали, предназначенные для соединения и координации взаимного положения основных узлов станка, называют базовыми. Точность обработки на станках зависит от точности направляющих станин, так как они определяют траекторию движения режущей кромки инструмента. Техническими условиями предусматриваются следующие требования:

1. Непрямолинейность направляющих не более 0,01 – 0,05 мм на длине 1000 мм в зависимости от назначения станка.

2. Непараллельность направляющих не более 0,01 – 0,05 мм на длине 1000 мм.

3. Неперпендикулярность поверхностей 0,02 – 0,1 мм на длине 1000 мм.

4. Шероховатость поверхности направляющих должна быть $Ra=0,4 \div 0,8$ мкм.

Станины изготавливаются из чугуна СЧ 15 – 32 и СЧ 21 – 40.

Технологическая последовательность обработки станин для всех видов производства принципиально одинакова и заключается в следующем: черновая и чистовая обработка поверхностей, обработка отверстий, отделочная обработка направляющих. Часто после черновой обработки станин предусматривают старение.

В табл.11.1 приведен примерный технологический процесс обработки станины токарного станка в условиях крупносерийного производства.

Т а б л и ц а 11.1

№ п/п	Операция
1	Черновое фрезерование поверхностей подложки на продольно-фрезерном станке.
2	Черновое фрезерование поверхностей направляющих на специальном девятишпиндельном продольно-фрезерном станке.
3	Искусственное старение в течении 24 часов.
4	Чистовое фрезерование поверхностей подложки на продольно-фрезерном станке.
5	Чистовое фрезерование поверхностей направляющих под шлифование на специальном продольно-фрезерном станке.
6	Строгание канавок, закруглений, вершин призм и снятие фасок.
7	Обработка крепежных отверстий.
8	Закалка поверхностей направляющих с нагревом ТВЧ.
9	Шлифование поверхностей направляющих на продольно-шлифовальном станке.

На первой операции станину устанавливают по необработанным поверхностям направляющих, которые в данном случае являются технологическими базами. Это позволяет на следующих операциях равномерно распределить припуск, что сохраняет наиболее плотный, однородный и износостойкий слой на направляющих. На второй операции обрабатывают все поверхности, которые образуют направляющие. Технологической базой является основание, обработанное на первой операции. Затем обрабатывают торцы и платики, расположенные в плоскостях, перпендикулярных направляющим, если они предусмотрены конструкцией станины.

Станины станков повышенной точности подвергают старению для снятия остаточных внутренних напряжений. Затем производится чистовая обработка поверхностей, параллельных основанию, от них обрабатывается основание. Последней операцией является обработка направляющих.

Черновое фрезерование направляющих станин на заводах крупносерийного производства производится на специальных многошпиндельных продольно-фрезерных станках (рис. 11.6). Закрепление станины производится с помощью быстродействующих электромеханических зажимов.

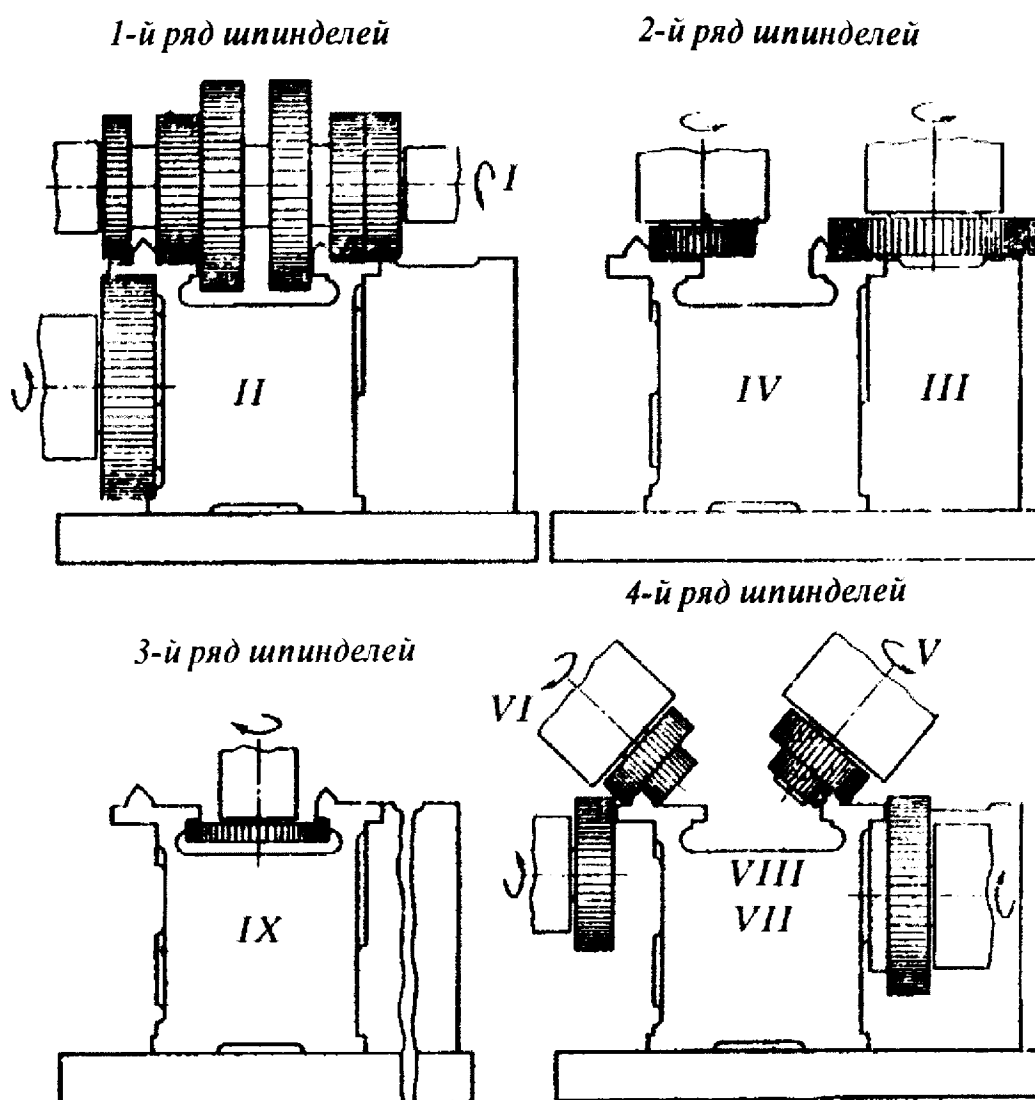


Рис. 11.6. Схема черновой обработки станины на девятишпиндельном продольно-фрезерном станке

Старение (естественное или искусственное) станин производят после черновой обработки для снятия остаточных напряжений, воз-

никающих при литье и черновой обработке резанием. Искусственное старение производится при нагреве до 400 – 600°С с последующей выдержкой в течение 4 ÷ 12 часов и последующим охлаждением до комнатной температуры в течение 5 ÷ 6 часов.

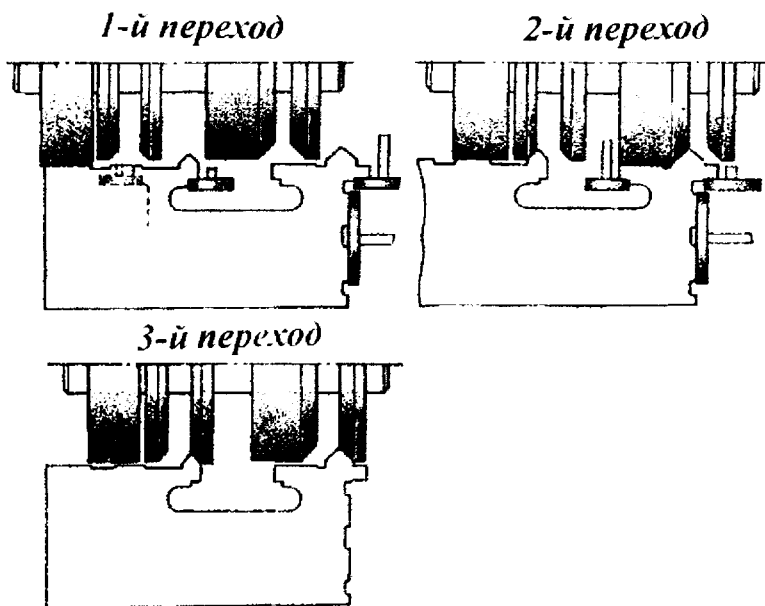


Рис. 11.7. Схема установки шлифовальных кругов для обработки направляющих за три перехода

строганием, тонким фрезерованием, шлифованием торцом или периферией круга и шабрением. Выбор способа отделки направляющих зависит от размеров станины, технических требований, а также от масштаба производства.

Шабрение применяют для отделки направляющих особо точных станков, направляющих крупногабаритных станин, которые нельзя обработать на шлифовальных станках. Шабрение обеспечивает точность по неплоскостности в пределах 0,02 мм на длине 1000 мм при 30 пятнах на площади 25 × 25 мм.

Наиболее производительным методом отделки направляющих является шлифование. Трудоемкость обработки направляющих станин методом шлифования в 4 ÷ 5 раз меньше процесса шабрения.

Тонкое фрезерование применяется для обработки прямолинейных направляющих простого профиля. Этот процесс эффективен при одновременном фрезеровании нескольких поверхностей фрезерными головками, оснащенными пластинками из твердого сплава.

Чистовую обработку направляющих станин производят в мелкосерийном производстве строганием, а в массовом – фрезерованием.

Обработку крепежных отверстий станин производят на радиально-сверлильных станках с использованием поворотных приспособлений и накладных кондукторов и на станках с ЧПУ.

Отделочная обработка направляющих станин осуществляется тонким

В условиях крупносерийного производства шлифование направляющих производится на специальных многошпиндельных станках. Схема установки шлифовальных кругов для обработки направляющих станины токарного станка показана на рис. 11.7. На станке пять шлифовальных кругов работают периферией и четыре торцом.

11.1.2. Влияние конструктивно-технологической модификации элементов станков на точность обработки деталей

Точность изготовления деталей определяется соответствием траектории движения рабочих органов станка по направляющим. Направляющие станков, особенно прецизионных, изготавливаются с высокой точностью. Однако высокая точность изготовления направляющих, как эталонов прямолинейных перемещений, не всегда гарантирует сохранение точности в процессе перемещений движущегося органа станка.

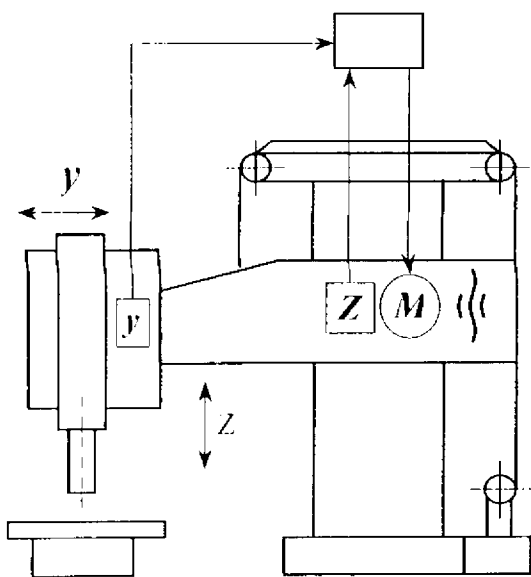


Рис. 11.8. Конструктивная компенсация прогибов для координатно-расточного станка

Например, установлено, что гравитационные нагрузки при перемещении подвижных органов координатно-расточного станка 2В460 приводят к отклонению от прямолинейности перемещения в 10 мкм на длине 1000 мм хода. Для компенсации переменных по длине перемещения прогибов колонн, стоек, порталов, консолей применяются гидравлические или электромеханические системы компенсации погрешностей за счет создания с помощью тросов опрокидывающего противомомента, величина которого стабилизирует

точность положения подвижных органов станка (рис. 11.8).

Применение аналогичного метода компенсации погрешностей при зубофрезеровании на станке модели 5343 позволило повысить точность нарезаемых зубчатых колес с 8 до 7-й степени точности.

На точность изготовления деталей и производительность обработки оказывает влияние виброустойчивость базовых деталей, в частности, станин станков. В связи с этим считается перспективным направлением изыскание дешевых конструкционных материалов, имеющих высокую виброустойчивость. К числу таких материалов можно отнести эпоксидный бетон «Гранитан», состоящий из стали и гранитной крошки. Фирма «Буркхард и Вебер» (ФРГ) для столов прецизионных станков применила материал, состоящий из частиц феррита и полистирольной связки. Демпфирующая способность этого материала в 100 раз больше, чем у чугуна. Кроме того, в перспективе планируется создать аналогичные, но более дешевые конструкционные материалы из промышленных отходов. Станки с полимерно-бетонными станинами выпускают фирмы «Манфорс и Борингер» (ФРГ), «Дик, Смит и Крейс» (Великобритания). Полимербетоны изготавливаются на основе эпоксидной, полиэфирной и акриловой смол с наполнителем из кварцевого песка, базальта, гранитной крошки.

Полимерные бетоны имеют предел прочности на растяжение $\sigma = 25 \text{ н/мм}^2$, негигроскопичны, стойкие к маслам, воде, СОЖ и другим агрессивным средам. Они имеют примерно в 10 раз высшую виброустойчивость по сравнению с чугуном.

Для экономии металла ряд фирм при изготовлении корпусных деталей применяют цементный бетон различных типов. Однако применение цементного бетона, как наиболее дешевого материала, сдерживается по целому ряду причин: цементный бетон имеет малую статическую жесткость, низкую прочность на растяжение и изгиб, гигроскопичен. Поэтому низкую жесткость приходится компенсировать за счет увеличения толщин стенок, а в ряде случаев изготавливать сплошным монолитом. Повышение точности на высокоскоростных станках достигается за счет улучшения динамических характеристик. Для гашения вибраций применяют пассивные или активные виброгасители. Пассивные виброгасители (демпферы) фрикционного, динамического и гидравлического действия применяются в расточных бортштангах. Активные виброгасители (вибраторы) управляются от датчика скорости того элемента, вибрацию которого необходимо снизить.

Для сохранения точности направляющих в течение жизненного цикла станка необходимо обеспечить повышенную их износостойкость. Наряду с традиционными способами защиты направляющих от твердых частиц, пыли и грязи, применяются новые: присадки к смаз-

кам, обеспечивающие процесс избирательного переноса; переход от направляющих скользящих к направляющим качения и термическая обработка направляющих.

Для предохранения направляющих от царапин и задиров на их поверхность наносится композиционный материал на основе эпоксидных смол типа SKC-3. Слой наносится в пастообразном виде под давлением в специальных приспособлениях. После затвердевания производится обработка лезвийными или абразивными инструментами. Покрытие SKC-3, работая в паре со стальными или чугунными закаленными направляющими, поглощает попавшие в зону скольжения направляющих твердые частицы, предупреждая тем самым их от появления царапин и задиров. Важным свойством сопряженной пары композиционный материал SKC-3 – чугун является равнозначность коэффициентов трения покоя и движения. Допустимое удельное давление 1500 н/см^2 при температуре 30°C .

На точность обрабатываемых деталей оказывают значительное влияние температурные деформации узлов станка. На прецизионных высокоточных станках применяются специальные системы автоматической компенсации тепловых деформаций станков. Устройства осуществляют направленные изменения тепловых потоков в узлах станков.

Одним из примеров устройства автоматического поддержания теплового режима является «тепловая труба», состоящая из пустотелого стержня, изготовленного из материала с высокой теплоемкостью и теплопроводностью. Пустотелый стержень, запаянный герметично, заполняется жидкостью с высокой теплоемкостью. На стержень устанавливаются медные диски, образующие радиатор, который обдувается струей воздуха. Тепловая трубка отсасывает тепло от источника. Пример охлаждения шпиндельного узла тепловой трубкой представлен на рис. 11.9.

На бесцентрово-шлифовальном станке модели 3M182, шпиндельный узел которого оснащен тепловыми трубками, погрешность от температурных деформаций диаметральных размеров в партии деталей снизилась в 1,5 раза. Со встроенными тепловыми трубками в шпиндельные узлы выпускаются фрезерно-сверлильно-расточные станки MC-50, фирма «Хамай» (Япония); моделей B-3V и B-10V, фирма «Шизока» (Япония) и др.

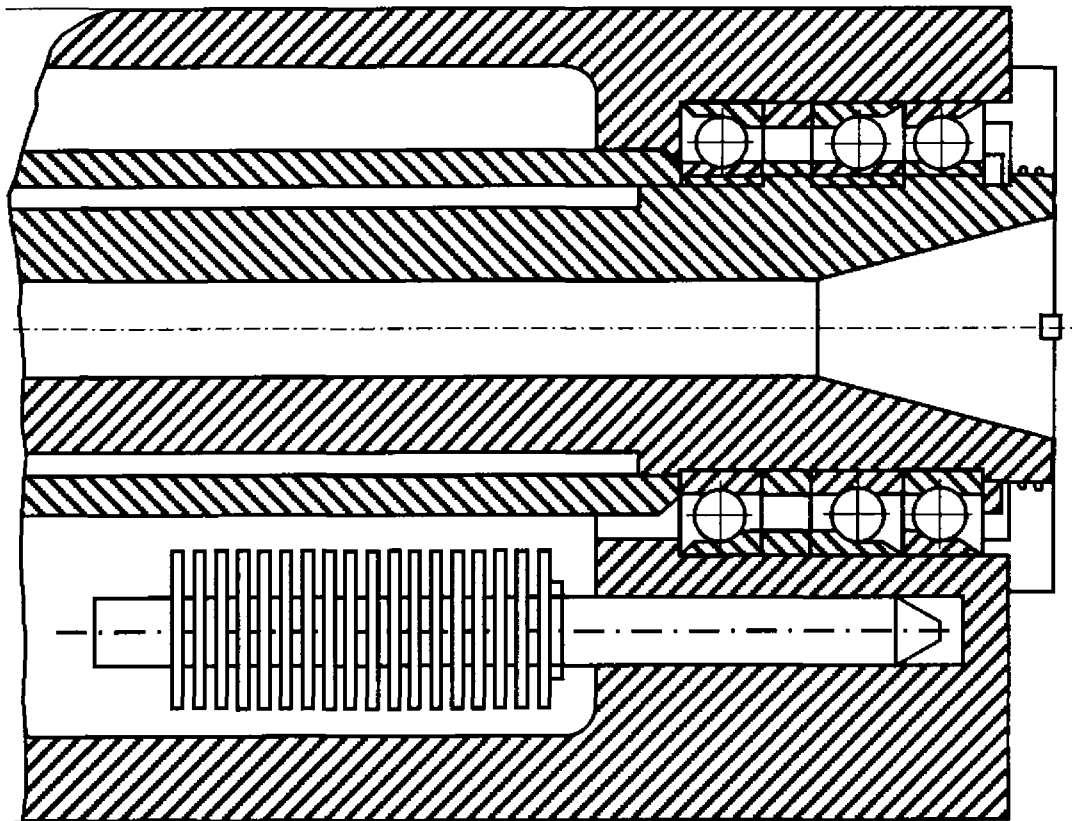


Рис. 11.9. Компенсация тепловых деформаций с помощью “тепловой трубы”

Вторым направлением компенсации тепловых деформаций и уменьшения погрешностей является установка в местах интенсивного тепловыделения датчиков. Сигналы, полученные от датчиков, поступают в систему CNC управления станком, по специальной программе рассчитывается температурное смещение шпинделя и вносится коррекция в положение инструмента.

Алгоритм величин коррекции разрабатывается на основе экспериментальных исследований температурных деформаций станков в различных условиях.

11.1.3. Коррекция систематических погрешностей

Коррекция систематических погрешностей обработки широко применяется для повышения точности позиционирования рабочих органов станка. На точность позиционирования влияют погрешности измерительной системы, геометрические погрешности (непрямолинейность, извернутость) направляющих. В случае включения в измерительную систему ходовых винтов (например, передача винт–гайка

качения) в сочетании с круговым измерительным преобразователем (датчиком) на точность позиционирования влияет также внутришаговая и накопленная погрешность винтовой пары.

Традиционный – механический – способ коррекции погрешностей позиционирования заключается в создании дополнительного кинематического звена, дифференциально связанного с движущимся органом. Это звено включает в себя корректирующее устройство, например, коррекционную линейку, на которой имеются выступы и впадины, соответствующие погрешностям системы.

По линейке скользит или катится ролик рычага, и с учетом выступов и впадин поворачивается рычаг вокруг своей оси. Поворот рычага оказывает непосредственное силовое воздействие на движущийся орган станка, замедляя или ускоряя его движение.

Другим примером использования метода коррекции систематических погрешностей является подналадка (поднастройка) станка в процессе обработки партии деталей.

Размерная коррекция заключается в перемещении резца на величину половины смещения вершины кривой рассеивания, вызванного влиянием систематической погрешности. В результате такого смещения режущей кромки инструмента центр группирования размеров случайных величин возвращается в первоначальное положение, т.е. совмещается с серединой поля допуска на изготовление детали. Вероятность появления брака устраняется.

Момент подналадки станка определяется по точечной диаграмме, когда величина среднеарифметической величины выборки из m деталей приближается к верхней границе (ВГ) зауженного допуска точечной диаграммы

$$ВГ = \bar{x} + U_p \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{m}},$$

где \bar{x} – среднеарифметическое значение размеров $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$.

Параметр U_p зависит от величины доверительной вероятности p .

Т а б л и ц а 11.2

p	0,8	0,9	0,95	0,99	0,999
U_p	0,842	1,282	1,645	2,326	3,00

На рис. 11.10 крестиками показаны размеры среднеарифметических групповых значений

выборок из m деталей. Автоматизация наладки по результатам активного контроля позволяет стабилизировать точность во времени, обеспечивая высокую производительность обработки.

Наибольшее влияние на величину поля рассеяния размеров оказывают: колебания припуска на обработку, твердость материала заготовки, изменение сил резания и скорости при позиционировании. Увеличение колебаний припуска и твердости увеличивает диапазон изменений сил резания, а изменение скорости исполнительных механизмов при позиционировании

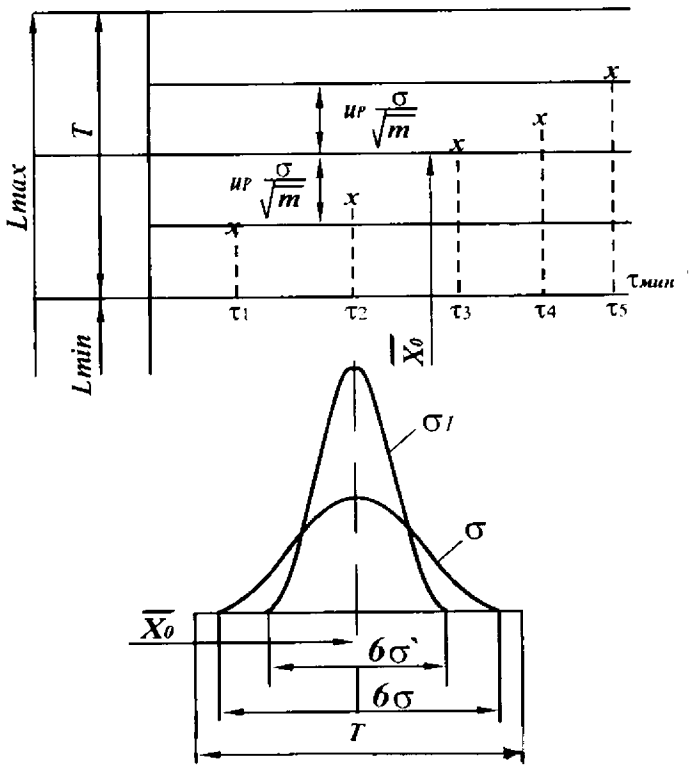


Рис. 11.10. Точечная диаграмма T – допуск на изготовление детали; σ – среднеквадратическое отклонение размеров; σ' – среднеквадратическое отклонение групповых величин; m – количество деталей в группе

увеличивает колебание пути на участке точного позиционирования.

Для коррекции случайных погрешностей, связанных с колебаниями припуска и твердости заготовки, можно путем предварительного замера этих параметров рассортировать заготовки на группы и для каждой группы внести соответствующие поправки в настроечные размеры.

Для автоматической стабилизации точности обработки при наличии изменяющихся случайных величин необходимо обеспечить постоянное значение радиальной составляющей усилия резания $F_y = const$.

Из анализа формулы $F_y = C_y \cdot t^x \cdot S^y \cdot HB^n V^z$ видно, что случайные изменения твердости материала HB , глубины t и скорости резания V могут быть компенсированы за счет изменения продольной подачи S .

Для стабилизации точности необходимо обеспечить постоянство упругих сжатий, которые пропорциональны силе резания. Таким образом, условием регулирования является обеспечение $F_y = const$, т.е.

$$C_y \cdot t^x \cdot S^y \cdot HB^n V^z = const.$$

Для обеспечения этого условия наиболее удобным в техническом отношении управляемым параметром является подача S . Упругое сжатие, точнее, его колебание, служит сигналом увеличения или уменьшения подачи для поддержания постоянства упругих деформаций, что равносильно поддержанию настроечного размера при случайных возмущениях. Данный метод повышения точности обработки может быть также использован для компенсации систематических погрешностей, возникающих в результате изменения жесткости технологической системы в процессе обработки. Например, при обтачивании длинных мало жестких деталей их прогиб при продольном перемещении инструмента относительно детали изменяется, вызывая отклонение от прямолинейности образующей. За счет коррекции величины продольной подачи можно компенсировать величину упругих сжатий по закону

$$y = \frac{F_y}{k} = \frac{M \cdot S}{k} = const,$$

где k – переменная жесткость технологической упругой системы;
 $M = C' \cdot t^x \cdot V^z \cdot HB$.

11.1.4. Анализ проблем повышения точности обработки

Ни у кого не вызывает сомнений тот факт, что повышение требований к точности обработки и повышение технологических возможностей обеспечения точности станков имеют тесную и неразрывную связь. За последнее столетие достигнут скачок точности в 1000 раз (от долей миллиметров до долей микрометров).

Многие изделия сегодня требуют обеспечения точности деталей, размеры которых изменяются в долях микрометра. Например, точность формы тел качения в прецизионных подшипниках качения или точность деталей гидроаппаратуры. Проникновение в молекулярный мир еще больше расширяет границы повышения точности.

Вопрос заключается в том, каким путем следует обеспечивать повышение точности.

Одной из главных проблем, сдерживающих повышение точности изготовления деталей, является метрологическая проблема. Действительно, при оценке точности изготовления деталей следует рассматривать три различных вида размеров:

1. Размер, поставленный на чертеже.
2. Полученный при измерении.
3. Фактический размер.

Точность размера, полученного при измерении, зависит от разрешающей способности прибора и субъективных погрешностей оператора. Проблемы метрологии следует рассматривать с двух позиций: первая – обеспечение точности изготовления деталей; вторая – оценка результатов измерения, т. е. контроль погрешности.

Первая задача включает конструкторско-технологические вопросы. Здесь учитываются возможности конструкции станков и технологии обеспечения точности.

Вторая задача связана с разрешающей способностью измерительных средств, входящих в состав технологического оборудования.

Измерительные системы должны обеспечивать точность настройки рабочих органов станка, точность их перемещения и позиционирования, точность базирования детали и, наконец, точность измерения размеров.

Главная проблема метрологии заключается в том, что требуемая точность измерительных приборов станков приближается к точности контрольно-измерительных средств. Многие станки с ЧПУ оснащаются измерительными средствами с дискретностью 0,001 мм. Такую же точность имеют и средства контроля. Если применение лазерных интерферометров главным образом предназначалось для юстировочных операций, то в последнее время ведутся работы по использованию интерферометров для измерения размеров непосредственно на станках при обработке деталей.

11.2. ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ШПИНДЕЛЕЙ СТАНКОВ

Шпиндель является одной из наиболее ответственных деталей металлорежущих станков. От качества шпиндельного узла зависит точность и качество обрабатываемых деталей.

Шпиндель станков относится к деталям типа валов с уступами. Точность изготовления шпинделя зависит от класса точности станка:

- нормальной точности;
- повышенной точности;
- высокой точности и особо высокой точности.

Овальность и конусность опорных шеек шпинделя для станков нормальной точности не должна превышать 50% допуска на диаметр шеек. Для станков повышенной точности эти величины не превышают 25%, а для станков высокой точности и особо высокой точности – 5 – 10% допуска на диаметр шеек.

Шероховатость поверхности опорных шеек: $R_a = 0,4 \div 0,8$ мкм для станков нормальной точности, $R_a = 0,1 \div 0,2$ мкм для станков повышенной точности и $R_a = 0,05 \div 0,1$ мкм для более точных станков.

Технологический процесс изготовления шпинделей особенно высокоточных прецизионных станков имеет более высокие требования по точности размеров, геометрической форме его элементов, расположению их относительно продольной оси, а также шероховатости поверхности опорных шеек.

Для уменьшения влияния остаточных напряжений, вызывающих деформацию шпинделя в процессе изготовления и эксплуатации заготовки, шпиндели подвергают дополнительной термической обработке. После черновой обработки подвергаются нормализации, а при дальнейшей обработке – искусственному старению.

Обработка шпинделей, имеющих центральное отверстие (для токарно-винторезных станков), начинается с фрезерования торцов и сверления в них центровых отверстий. Эти отверстия служат технологической базой для чернового и получистового обтачивания наружных поверхностей.

В серийном производстве обтачивание производится на гидрокопировальных станках за несколько проходов. Число ходов определяется размерами шпинделя, а, главное, величиной припуска на обработку.

Часто черновую обработку наружных поверхностей производят на многорезцовых станках.

Сквозное отверстие шпинделя сверлят на специальном станке для глубокого сверления перовым сверлом, оснащенным пластинкой из твердого сплава. Для уменьшения увода сверла отверстие сверлят до половины вала с одного конца и вторую половину с другого конца,

т. е. за две установки с базированием по обточенным шейкам, которые являются основной конструкторской базой. Затем зенкеруют отверстие с переднего конца шпинделя коническим зенкером на вертикально-сверлильном станке с последующим растачиванием конического отверстия с переднего и заднего концов шпинделя при одновременном подрезании обоих торцов на токарном станке.

При базировании накладного кондуктора по коническому отверстию сверлят отверстие во фланце шпинделя.

После нарезания резьб производится термическая обработка – закалка с нагревом ТВЧ на глубину 1,2 – 2,2 мм, HRC = 45 ÷ 50.

Сущность термической обработки заключается в кратковременном нагреве поверхностного слоя индуктором ТВЧ и быстром охлаждении. Остальная часть металла не нагревается, что исключает деформацию шпинделя. Закалке подвергаются поверхность наружного конуса под патрон, поверхность конического отверстия в переднем конце шпинделя и шейки под подшипники.

При изготовлении шпинделей из стали 20 их подвергают цементации с последующей закалкой и отпуском.

Шлицы фрезеруют с базированием шпинделя по отверстиям центровых пробок, которые устанавливаются во внутренние конические поверхности. Переднее конусное отверстие шлифуют на внутришлифовальном станке с базированием шпинделя по цилиндрическим шейкам для подшипников.

Контроль concentричности конусного отверстия относительно опорных шеек проверяют с помощью оправки, установленной в коническое отверстие переднего конца шпинделя и двух индикаторов, упирающихся в цилиндрическую часть оправки, на расстоянии 300 мм друг от друга. При проверке concentричности вал устанавливают опорными шейками на призмы. При вращении шпинделя отклонение стрелки индикатора не должно быть больше 5 – 10 мкм.

Особенности обработки шпинделей прецизионных станков

Технологический процесс изготовления шпинделей прецизионных станков более сложный, так как к ним предъявляются более высокие требования. Например, у шпинделя координатно-расточного станка 2А430 отклонения от конусности и овальности опорных шеек не должны превышать 0,002 мм, биение должно быть не более 0,003 мм, параметр шероховатости Ra = 0,04 мкм. Для устранения

влияния остаточных напряжений, которые могут вызвать деформацию шпинделя не только в процессе изготовления, но и эксплуатации, шпиндели прецизионных станков подвергаются многократной термической обработке.

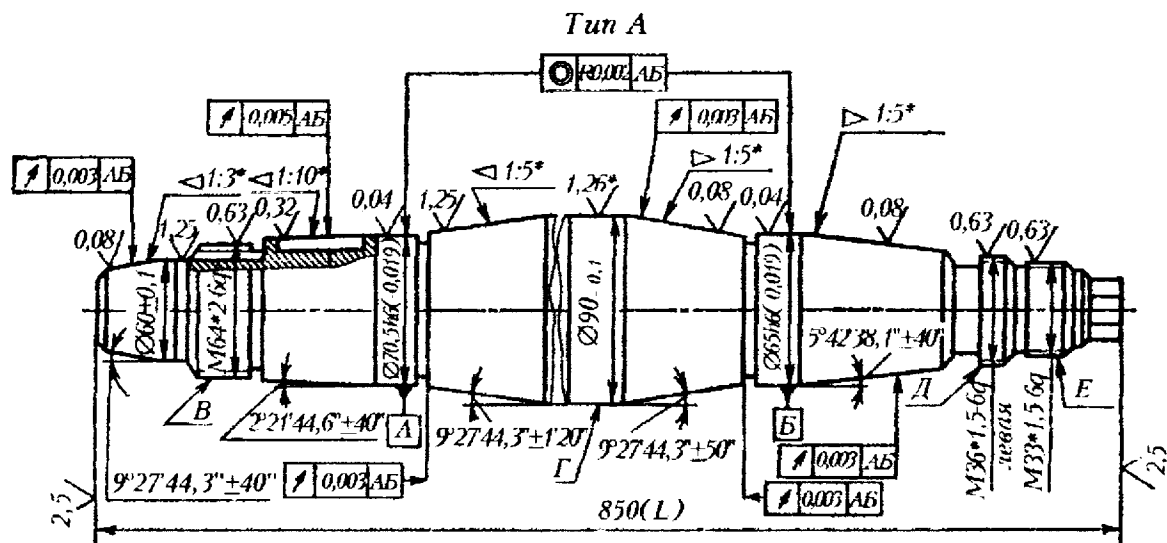


Рис. 11.11. Эскиз шпинделя

Шпиндели зубошлифовальных и резьбошлифовальных станков (рис. 11.11) высокой точности в условиях мелкосерийного производства изготавливаются по следующему технологическому процессу:

1. Отрезка заготовки из стали 38ХМЮА.
2. Кузнечная обработка.
3. Термическая обработка (обжиг).
4. Черновая обработка торцов и центровых отверстий на токарном станке.
5. Термическая обработка – закалка с высоким отпуском.
6. Обработка торцов и центровых отверстий.
7. Обработка наружных поверхностей.
8. Обработка пазов, лысок.
9. Обработка образцов-свидетелей под шлифование.
10. Предварительное шлифование точных наружных поверхностей и торцов на круглошлифовальном станке; вал устанавливается на центровых фасках.
11. Термическая обработка – стабилизирующий отпуск (вместе с образцами-свидетелями).
12. Шлифование центровых (базовых) фасок.

13. Предварительное шлифование точных наружных поверхностей и торцов с припуском 0,15 мм. Овальность и конусность обработанных базовых поверхностей не должна превышать 0,005 мм, Ra ≤ 0,63 мкм.

14. Термическая обработка – отпуск стабилизирующий (вместе с образцами-свидетелями).

15. Шлифование центровых (базовых) фасок.

16. Шлифование наружных рабочих поверхностей и торцов под азотирование с припуском под последующую обработку 0,05–0,08 мм. Овальность и конусность базовых поверхностей не должна превышать 0,0025 мм. Радиальное биение относительно оси должно быть не более 0,008 мм, шероховатость Ra ≤ 0,63 мкм.

17. Термическая обработка – азотирование (вместе с образцами-свидетелями). Азотирование газовое в шахтных электропечах.

18. Шлифование центровых (базовых) фасок.

Эту и последующую операции для шпинделей станков класса точности В, А, С рекомендуется выполнять в термоконстантном помещении.

19. Окончательное шлифование наружных поверхностей.

20. Нарезание метрической резьбы на резьбошлифовальных станках высокой точности.

21. Суперфиниш опорных шеек.

Все шпиндели быстроходных прецизионных станков проходят балансировку в собранном виде. Погрешности изготовления и монтажа шпиндельного узла, а также различная плотность металла деталей, входящих в шпиндельный узел приводят к неуравновешенности, что в условиях эксплуатации может вызвать появление вибраций. Вибрации снижают стойкость режущего инструмента, ухудшают качество обрабатываемых поверхностей, увеличивают износ опор шпинделя.

Неуравновешенность может быть статической, когда не совпадает центр тяжести детали с осью вращения (она вызывает только центробежную силу) и динамической, когда действие неуравновешенных масс вызывает появление пары сил и центробежных моментов инерции не равных нулю.

Для устранения неуравновешенности шпиндельный узел проходит балансировку. В соответствии с двумя видами неуравновешенности существует два вида балансировок – статическая и динамическая.

Статическую балансировку применяют обычно для деталей, у которых отношение L/D мало (маховики, диски, зубчатые колеса).

У шпинделя станков $L/D \gg 1$. На шпиндель монтируется ряд деталей (зубчатые колеса, гайки, кольца, втулки, подшипники, фланцы), то для шпиндельного узла характерны оба вида неуравновешенности. Поэтому шпиндельный узел подвергают динамической балансировке, которая устраняет оба вида неуравновешенности. Динамическую балансировку производят на специальных балансировочных станках.

11.3. ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ХОДОВЫХ ВИНТОВ

Служебное назначение ходовых винтов. Ходовые винты станков служат для преобразования вращательного движения в поступательное линейное перемещение с помощью сопряженной с ним гайкой различных узлов станка (суппортов, кареток, фартуков, столов и др.) с заданной точностью.

Ходовые винты в зависимости от степени точности перемещения, которую они обеспечивают, делятся на пять классов: 0, 1, 2, 3, 4.

В металлорежущих станках в основном применяются ходовые винты 0-го и 2-го классов точности. Профиль резьбы ходовых винтов может быть прямоугольным, полукруглым, трапецеидальным и треугольным. Ходовые винты с трапецеидальной резьбой являются наиболее технологичными (рис. 11.12). Винты с трапецеидальным профилем позволяют с помощью разрезной гайки регулировать осевые зазоры. Упрощается технология нарезания и шлифования резьбы этих винтов.

Ходовые винты имеют малую жесткость, так как их длина во много раз превосходит диаметр. Поэтому при изготовлении под действием сил резания, а также собственного веса возникают деформации. Все это создает определенные трудности при изготовлении ходовых винтов.

Прецизионные ходовые винты 0-го и 1-го классов точности подвергаются неоднократной термической обработке: стабилизирующему отжигу, закалке, высокотемпературному отпуску, стабилизирующему отпуску. После черновых токарных операций производят высокотемпературный отпуск. Винты из стали ХВГ диаметром 40 – 80 мм

подвергают искусственному старению в масляной ванне в течение 30 часов при температуре 140 – 150°C.

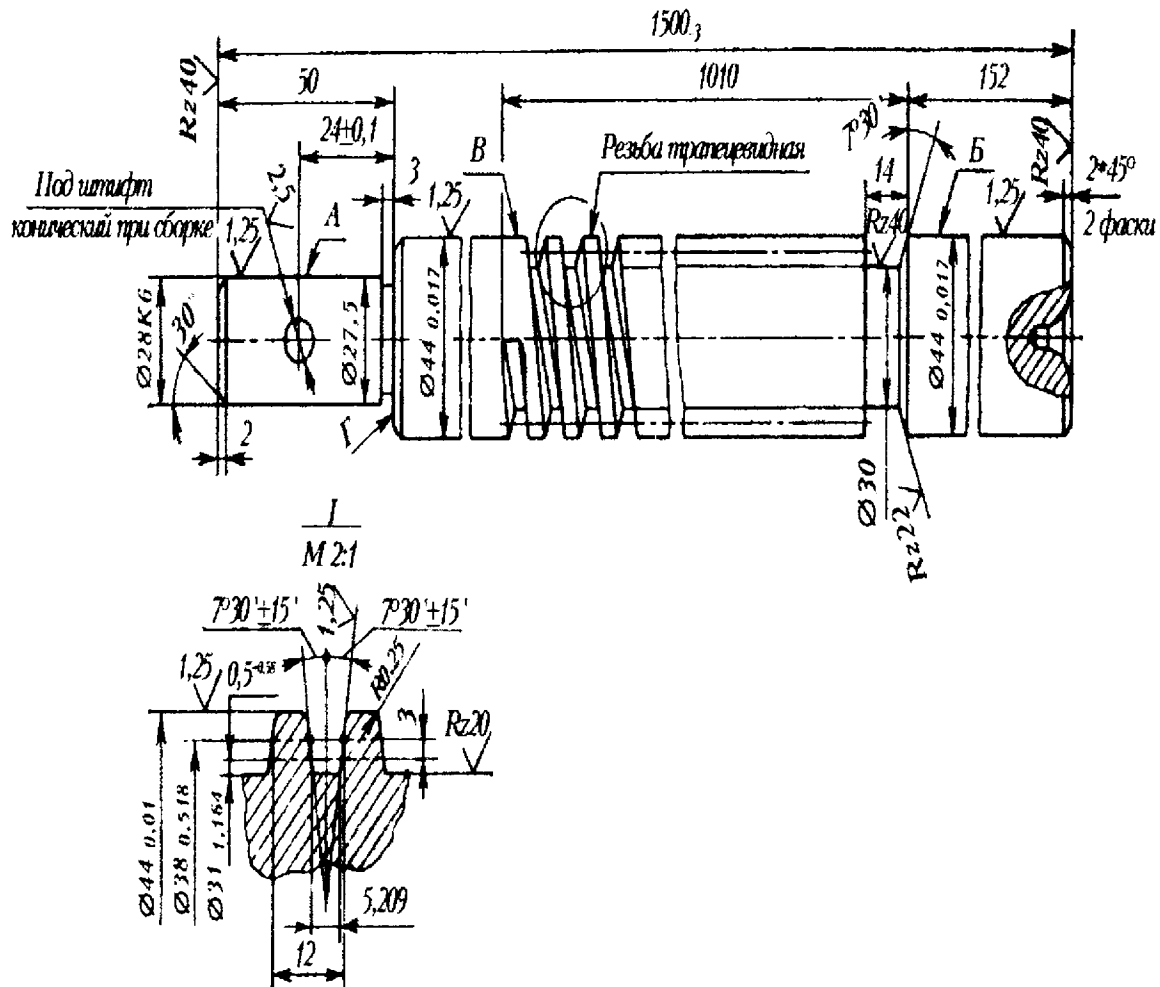


Рис. 11.12. Ходовой винт с трапецеидальным профилем

Термическое упрочнение винтов до твердости $HRC = 57 \div 60$ обеспечивается объемной закалкой в шахтной соляной ванне в вертикальном подвешенном положении при ступенчатом нагреве: сначала нагрев до 550 – 600°C и выдержка в течение одного часа, затем постепенное увеличение температуры до 840 – 850°C.

Охлаждение производится в масле, подогретом до 50°C. После закалки предусмотрен отпуск.

Предварительное нарезание резьбы производится многониточным кругом из монокорунда 44А8-16М1-28-12К. Окончательное шлифование трапецеидальной резьбы производится на прецизионных

резьбошлифовальных станках 5Д822В однопиточным эльборовым кругом Л12-Л25СМ1-СМ28К 100%.

Типовой технологический процесс механической обработки ходовых винтов из стали ХВГ с трапецеидальным профилем резьбы в условиях серийного производства приведен ниже:

1. Отрезка заготовок и образцов-свидетелей. Образцы-свидетели проходят все операции механической и термической обработки вместе с партией заготовок.

2. Термическая обработка (отжиг).

3. Обработка торцов и центровых отверстий на токарных станках при установке заготовки в патроне и люнете с переустановкой на 180° и повторной выверкой на биение.

4. Предварительная обработка наружной поверхности на токарно-винторезных станках и токарных с ЧПУ.

5. Термическая обработка. Отжиг стабилизирующий (вместе с образцами-свидетелями).

6. Обработка торцов и центральных отверстий (пересцентровка).

7. Обработка наружных поверхностей под шлифование на токарно-винторезном станке с подвижным люнетом или на токарном станке с ЧПУ с подвижным программируемым люнетом.

8. Обработка пазов, отверстий и других конструктивных элементов.

9. Предварительное шлифование наружной поверхности под трапецеидальную резьбу.

10. Термическая обработка, закалка, отпуск (вместе с образцами-свидетелями).

11. Шлифование центровых фасок. Шероховатость $Ra \leq 1,25$ мкм. Допускается вместо шлифования притирка на токарном станке.

12. Предварительная обработка точных наружных поверхностей и торцов. Операция может производиться точением на токарных станках резцами из эльбора-Р или шлифованием.

13. Предварительная обработка резьбы многопиточным кругом на резьбошлифовальном станке.

14. Шлифование заходов резьбы на резьбошлифовальном станке.

15. Контроль на отсутствие трещин.

16. Термическая обработка. Отпуск стабилизирующий.

17. Шлифование центровых фасок ($Ra = 0,32 \div 0,16$ мкм).

18.Предварительное шлифование точных наружных поверхностей и торцов. Припуск на посадочные поверхности 0,2 – 0,3 мм.

19.Предварительное (получистовое) шлифование трапециевидной резьбы на резьбошлифовальном станке кругами из эльбора.

20.Термическая обработка. Отпуск стабилизирующий.

21.Шлифование центровых фасок ($Ra = 0,32 \div 0,16$ мкм).

22.Получистовое шлифование точных наружных поверхностей и опорных торцов.

23.Получистовое шлифование трапециевидной резьбы.

24.Термическая обработка. Отпуск стабилизирующий.

25.Шлифование центровых фасок. Операция выполняется в термоконстантном помещении.

26.Окончательное шлифование трапециевидной резьбы.

27.Шлифование фасок на вершинах витков резьбы.

28.Окончательное шлифование базовых наружных поверхностей и опорных торцов.

29.Контроль.

После завершения обработки производится контроль наружного и среднего диаметров, отклонение от круглости, угол профиля и шаг резьбы. Контроль осуществляется скобами, профильными шаблонами, специальными измерительными микроскопами, приборами для контроля погрешности шага.

11.4. ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС

11.4.1. Служебное назначение зубчатых колес

Цилиндрические зубчатые колеса служат для передачи вращательного движения между валами. Различают: силовые и кинематические зубчатые передачи. По ГОСТ 1643 – 81 предусмотрено 12 степеней точности зубчатых колес. Для 1-й и 2-й степени точности допуски и предельные отклонения в ГОСТе не приводятся.

На рис. 11.13 показаны основные типы цилиндрических зубчатых колес средних размеров, применяемых в коробках скоростей автомобилей, тракторов, станков: 1-я группа – одновенцовые зубчатые колеса; 2-я – многовенцовые; 3-я – одновенцовые в виде дисков; 4-я – зубчатые венцы, насаживаемые на ступицу; 5-я – валы шестерни [92].

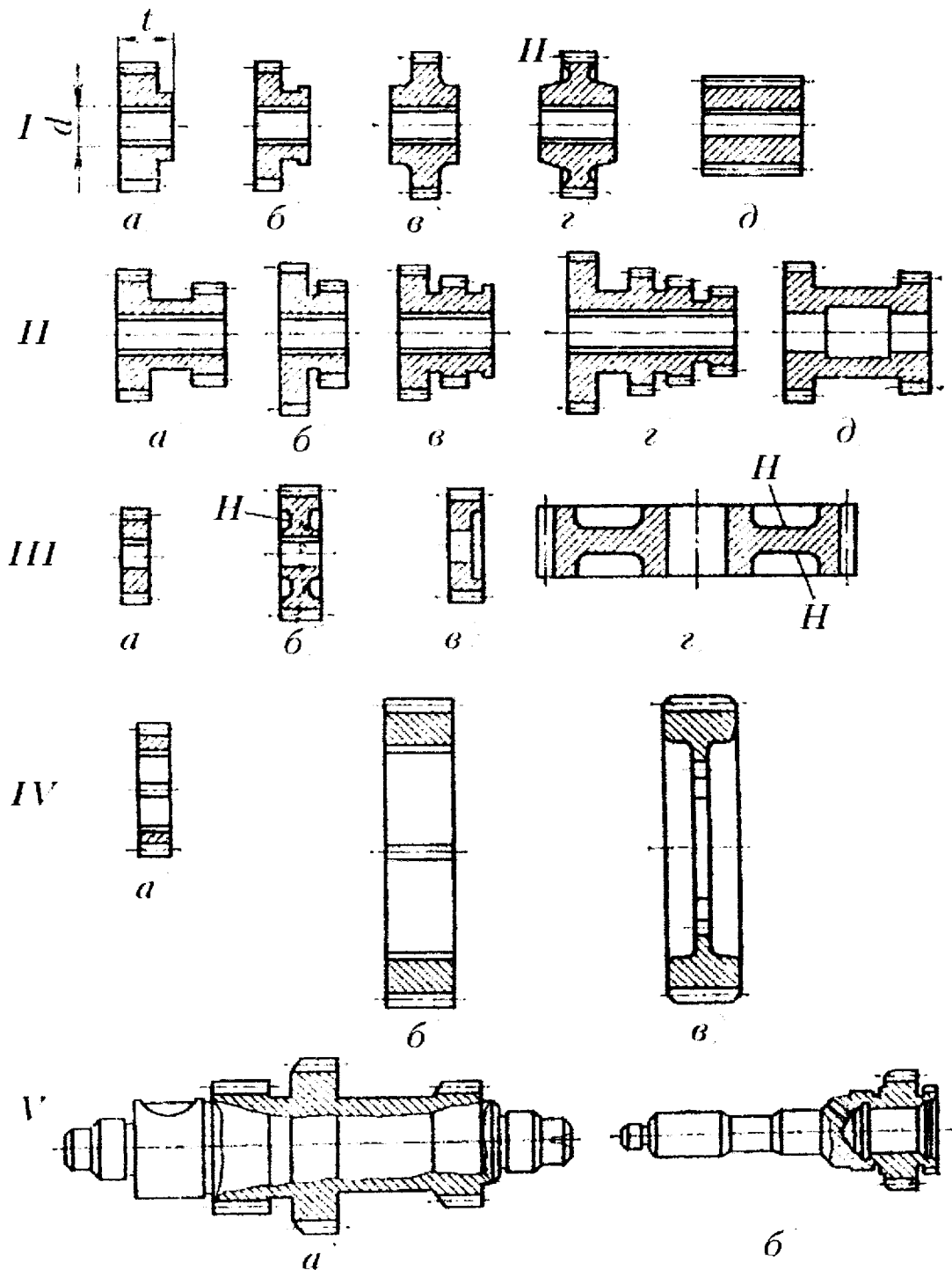


Рис. 11.13. Конструктивные разновидности цилиндрических зубчатых колес

Колеса указанных типов изготавливаются с прямыми и наклонными зубьями. Для передачи больших крутящих моментов применяют шевронные зубчатые колеса. Чтобы обеспечить в прямозубых быстроходных колесах расположение пятна контакта в средней части длины зуба, профиль зуба делают бочкообразным (рис. 11.14).

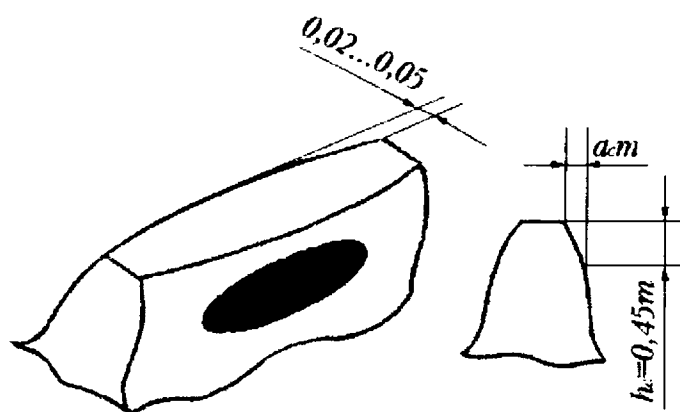


Рис. 11.14. Пятно контакта при бочкообразном профиле зуба

На вершине делают срез (фланкируют) на величину $a_c m$, где a_c – коэффициент; m – модуль, мм.

Для колес с модулем 2 – 7 мм, $a_c m = 0,03 \div 0,063$ мм.

Основные требования к силовым передачам – износостойкость, плавность и бесшумность работы. Чем выше скорость колес, тем точнее они должны быть изготовлены.

Связь окружной скорости с шероховатостью поверхности и степенью точности представлена в табл. 11.3.

Т а б л и ц а 11.3. Зависимость степени точности и Ra от окружной скорости

Окружная скорость, м/с	Степень точности	Ra, мкм
до 2,5	8	1,25 – 0,63
2,5 – 6	7	2,5 – 1,25
6 – 16	6	1,2 – 0,63
16 – 40	5 – 6	0,63 – 0,32

Степень точности кинематических передач устанавливается с учетом назначения передачи, например:

Т а б л и ц а

№ п/п	Типы колес	Рекомендуемая степень точности
1	Зубчатые колеса делительных механизмов	5
2	Сменные колеса гитары дифференциала	6
3	Сменные колеса коробок передач станков	7

11.4.2. Материал и термическая обработка

В зависимости от служебного назначения зубчатые колеса изготавливаются из углеродистых, ст 40, ст 45, легированных 12Х2Н4А, 20Х, 40Х, 18ХГТ сталей и в ряде случаев из чугуна, пластмасс и

бронзы. Зубчатые колеса, изготовленные из сталей 20Х, 12Х2Н4А подвергаются цементации при температуре 920 – 950°С в течение 7 – 10 часов с последующей закалкой (нагрев до 820 – 840°С и охлаждении в масле). Для уменьшения остаточных напряжений, возникающих после закалки, применяется низкотемпературный отпуск при температуре 180 – 200°С.

В сложнолегированных сталях, например, 12Х2Н4А, точка мартенситного превращения находится ниже нуля, поэтому в структуре этой стали сохраняется большое количество остаточного аустенита. Для превращения остаточного аустенита в мартенсит применяют обработку холодом в среде жидкого азота при температуре (–70°С).

После химико-термической обработки твердость HRC = 58 ÷ 63. Сталь 40Х, ст 45 и другие подвергаются закалке: нагрев ТВЧ, охлаждение в масле, низкий отпуск при температуре 180 – 200°С.

Глубины упрочненных слоев в зависимости от модуля зубчатых колес и вида упрочнения изменяются, например: для зубчатых колес с модулем 3 – 4,5 глубина цементации изменяется от 0,7 до 1,0 мм. После нитроцементации – от 0,5 до 0,8 мм, после азотирования – от 0,35 до 0,5 мм и после закалки ТВЧ – от 0,8 до 1,2 мм.

Последовательность механической и термической обработки при изготовлении зубчатого колеса 6-й степени точности диаметром 80 – 200 мм с $m=2,5 \div 5,0$ мм из стали 12Х2Н4А для мелкосерийного производства указана ниже.

1. Заготовка-штамповка или поковка.
2. Предварительная токарно-револьверная обработка.
3. Нормализация – для измельчения структуры и уменьшения напряжений (режим нагрева до $960 \pm 10^\circ\text{C}$, выдержка при данной температуре в течении 1,5 – 2 часов, охлаждение на воздухе).
4. Механическая обработка кругом.
5. Омеднение (гальваническое покрытие).
6. Удаление меди с тех поверхностей, которые должны подвергаться цементации, нарезание зубчатого венца.
7. Цементация, удаление меди, закалка и отпуск. Глубина цементации 1,0 – 1,5 мм, температура цементации $930 \pm 10^\circ\text{C}$, температура закалки $870 \pm 10^\circ\text{C}$, температура отпуска 180 – 200°С.
8. Чистовая механическая обработка (шлифование наружного диаметра, торцов и отверстий).

9. Искусственное старение – в электрической масляной ванне (веретенное 3). Температура старения $150 \pm 10^\circ\text{C}$ с выдержкой 8 – 10 часов.

10. Отделочная механическая обработка. Окончательное шлифование внутреннего отверстия и базового торца. Установка зубчатого колеса производится по трем роликам, для обеспечения концентричности диаметра делительной окружности и внутреннего диаметра отверстия.

11. Чистовое зубошлифование, контроль и консервация.

11.4.3. Выбор баз и технологический маршрут обработки зубчатого колеса

Базирование зубчатых колес связано с их конструктивным оформлением, со служебным назначением и точностью зубчатого колеса. На первых операциях обрабатываются те поверхности, которые в дальнейшем будут использованы в качестве установочных баз на большинстве последующих операций.

Например, при изготовлении зубчатых колес (вал – шестерня) – позиция V (рис. 11.13) на первой операции обрабатываются торцы и центровые отверстия, которые в дальнейшем используются в качестве установочной базы почти на всех последующих операциях.

При изготовлении зубчатых колес типа (III – IV, рис. 11.13), которые имеют малую ширину зубчатого венца и большую площадь торцевой поверхности, на первой операции обрабатывается торец и отверстие, которые в дальнейшем будут использоваться в качестве технологической базы на большинстве операций.

При изготовлении зубчатых колес (типа I – II, рис. 11.13), имеющих ступицу, на первой операции обрабатывают отверстие, выполняющее роль двойной направляющей базы, и базовый торец (опорную базу), которые затем используются как комплект установочных баз на токарных зубонарезных и зубошлифовальных операциях.

Маршрут изготовления зубчатых колес 5 – 6-й степеней точности заканчивается шлифованием зубьев колеса, а маршрут изготовления колес 7 – 8-й степеней точности – шевингованием до термической обработки, калибровкой отверстия и снятием заусениц после термической обработки. Операция зубошлифования предусматрива-

ется только при наличии больших погрешностей, возникающих после термической обработки.

В табл. 11.4 представлен технологический маршрут изготовления зубчатого колеса со ступицей 5-й и 6-й степени точности.

Т а б л и ц а 11.4

№ п/п	Содержание операции
1.	Изготовление заготовки (штамповка)
2.	Предварительная токарная обработка (рис.11.15, <i>а</i>)
3.	Предварительная обработка базового торца А, наружного диаметра и отверстия с другой стороны (рис.11.15, <i>б</i>)
4.	Контроль
5.	Термическая обработка, нормализация и отпуск
6.	Получистовая токарная обработка с одной стороны (по аналогии с операцией №2) под протягивание
7.	То же с другой стороны по аналогии с операцией №3
8.	Протягивание шлицевого отверстия
9.	Зачистка заусенцев на торце шлицевого отверстия
10.	Предварительное шлифование базового торца А и наружного диаметра (рис. 11.15, <i>в</i>)
11.	Предварительное шлифование отверстия шлицев и торца поверхности ступицы
12.	Зубонарезание под последующее шлифование
13.	Зубозакругление
14.	Термическая обработка, цементация, закалка и отпуск
15.	Притирка шлицев чугуном притиром
16.	Второе предварительное шлифование базового торца А и наружной цилиндрической поверхности на специальной цанговой оправке
17.	Второе предварительное шлифование отверстия
18.	Искусственное старение – стабилизирующий отпуск.
19.	Окончательное шлифование базового торца А цилиндрической поверхности на центральной оправке с конусом 1: 10000, биение не более 0,003 ÷ 0,005 мм

20.	Окончательное шлифование отверстия и торца зубчатого колеса с установкой в четырехкулачковый патрон с выверкой по наружному диаметру с точностью 0,005 мкм
21.	Шлифование зубчатого венца на зубошлифовальном станке класса А (5851, 5833)
22.	Мойка
23.	Контроль параметров зубчатого колеса

Для зубчатых колес 5-й степени точности операции 19 и 20 выполняются в термоконстантном цехе, а для зубчатых колес 6-й степени точности следует выполнять операцию 21.

При изготовлении зубчатых колес 7 – 8-й степени точности нормализацию и отпуск следует производить после штамповки. Для зубчатых колес 7-й и 8-й степени точности до операции “термическая обработка” предусматривается операция “зубошевингование зубьев”. Она обеспечивает 6-ю степень точности и при потере точности во время термической обработки на одну степень конечная, 7-я степень точности будет обеспечена.

Плоские зубчатые колеса без ступицы типа III – IV при обработке базируются по поверхности торцов. Процесс выполняется на токарно-револьверных станках, после чего следует шлифование торцов и растачивание отверстия, а затем протягивание шлицев и обточка наружного диаметра на оправке с базированием по малому диаметру шлицев.

На рис. 11.16 показаны эскизы обработки и способы базирования плоского зубчатого колеса на операциях:

1) предварительная (черновая) токарная обработка с двух сторон (рис. 11.16, а) на вертикально-токарном патронном полуавтомате;

2) чистовое растачивание отверстия по 7-му качеству точности при установке с поджимом к торцу с помощью скошенных кулачков на алмазно-расточном станке (рис. 11.16, б);

3) чистовое обтачивание по венцам на круглой оправке с базированием по малому диаметру шлицев (рис. 11.16, в).

В соответствии с технологическим процессом изготовления зубчатых колес их контроль осуществляется в два этапа: на участке изготовления колес до зубообработки и на участке зубообработки.

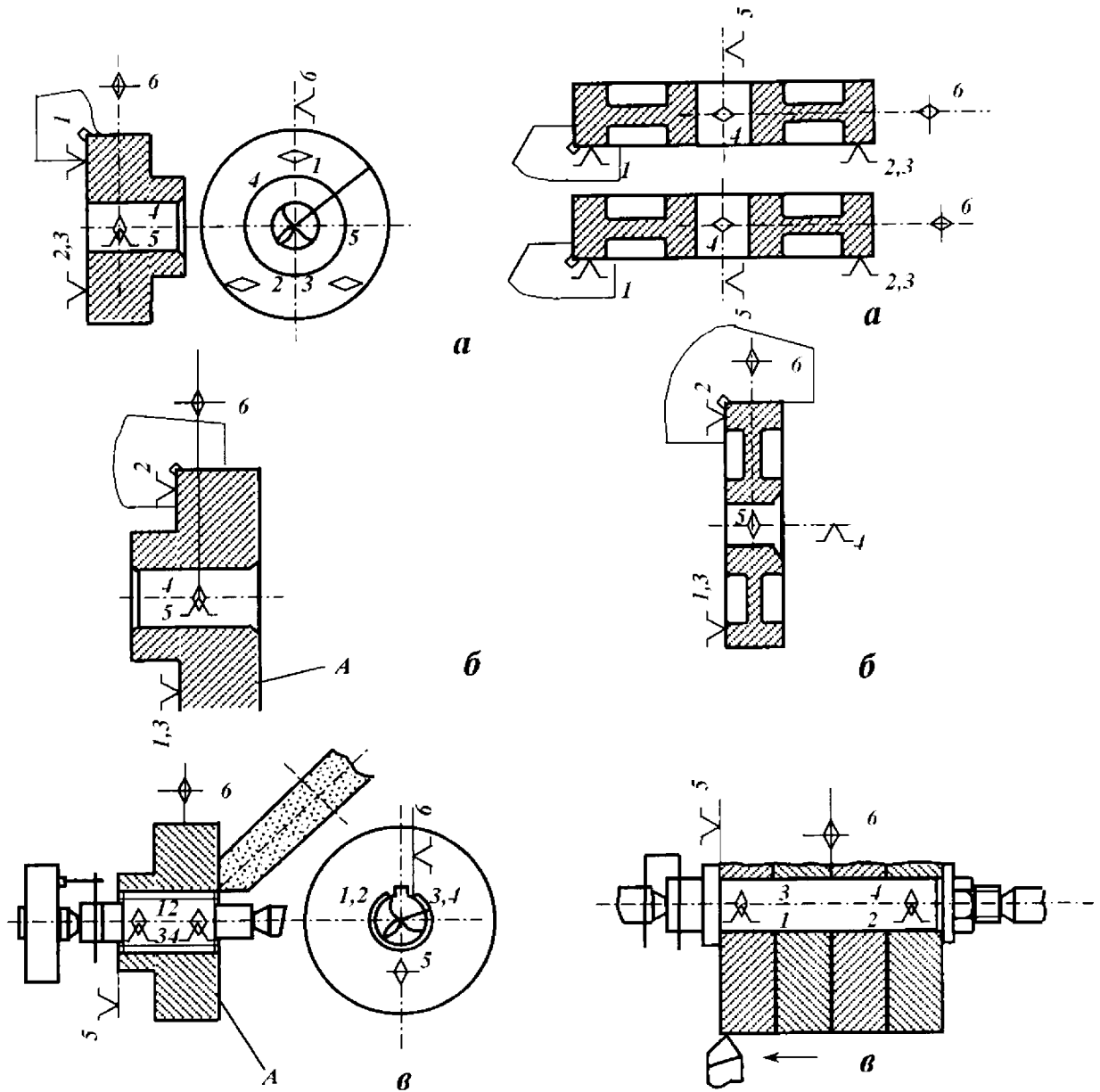


Рис. 11.15. Операционные эскизы

Рис. 11.16. Операционные эскизы

Важнейшими параметрами, характеризующими точность зубчатого колеса, являются точностные параметры шлицевого отверстия и зубчатого венца. Следует обеспечить совпадение оси шлицевого отверстия с осью делительной окружности колеса.

При обработке зубчатого венца требуется обеспечить точность параметров, от которых зависит работоспособность зубчатой передачи.

К числу основных показателей точности зубчатого колеса относятся:

- радиальное биение зубчатого венца, F_{rr} ;
- колебание длины общей нормали, V_{wr} ;

- предельное отклонение шага, f_{ptr} ;
- наибольшая разность соседних окружных шагов, V_{pr} ;
- накопленная погрешность шага, F_{pr} ;
- погрешность направления зуба, $F_{\beta r\xi}$.

Количественная оценка точности зубчатых колес на различных стадиях технологического процесса приведена в табл.11.5 [60].

Т а б л и ц а 11.5

Показатели точности	Стадии обработки	Пределы отклонений, мкм	Размах R, мкм	Среднее значение и его ошибка $\bar{x} \pm \Delta x$	σ , мкм	Степень точности
Радиальное биение F_{rr}	Зубофрезерование, цементация, закалка, восстановление баз	17...75	58	42,7±6,3	14,9	9,2
		20...86	66	44,6±7,9	18,7	9,8
		37...97	60	62,3±6,8	16,0	10,2
		33...116	83	75,8±9,8	23,9	11,4
Колебания длины общей нормали V_{wr}	Зубофрезерование, цементация, закалка	5...30	25	16,0±5,8	7,1	7,3
		10...35	25	20,4±5,6	6,2	7,2
		20...55	35	30,7±6,2	9,0	9,0
Накопленная погрешность шага F_{pr}	Зубофрезерование, цементация, закалка, восстановление баз	20...105	85	58,6±8,2	9,8	9,0
		—	100	54,0±10,6	25,8	9,3
		32...119	87	71,4±9,2	22,3	9,5
		37...163	126	95,3±14,3	35,2	10,3
Погрешность направления зуба $F_{\beta r}$	Зубофрезерование, цементация, закалка, восстановление баз	19...51	32	29,5±3,9	8,2	9,6
		30...90	50	55,7±5,8	13,6	10,8
		31...97	66	67,3±8,2	19,8	11,4
		28...146	118	79,3±15,0	36,8	12,3

Из анализа данных, приведенных в таблице 11.5, видно, что после цементации средняя величина погрешности в большинстве случаев остается неизменной, а после закалки колес и восстановления баз существенно возрастает.

11.5. ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ПЛАСТМАСС И МЕТАЛЛОКЕРАМИКИ

11.5.1. Характеристика пластмасс и методы изготовления пластмассовых деталей

Пластмассы из синтетических смол или их композиций с различными наполнителями в настоящее время находят широкое применение в автомобилестроении, авиационной, химической и оборонной промышленности.

К достоинствам пластмасс относятся: при малом весе достаточно высокая прочность, простота изготовления сложных конструкций, виброустойчивость, способность поглощать шум, высокая стойкость против воздействия агрессивных сред и др.

В машиностроении пластмассы применяются, например, для изготовления различных рукояток, рычагов управления, подшипниковых втулок, различных уплотнений, крышек коробки передач, крыльчаток, шестерен, шкивов, ободов, катков, протекторов шин и др. Например, в автомобиле «Форд Таунус» (США) из пластмасс изготавливают 123 детали, применяемые в 67 сборочных единицах.

Выбор материала зависит от назначения и технических требований, предъявляемых к изделию (прочность, герметичность, теплоустойчивость, износостойкость и др.).

Изделия изготавливают из термопластичных и термореактивных полимеров. К термопластичным полимерам относятся: полиэтилен, полиимиды, поливинилхлорид, полиуретан, полиформальдегид, поликарбонат, фторопласты и др.

Все указанные пластмассы, за исключением фторопласта, способны многократно размягчаться при нагреве и вновь отвердевать при охлаждении. Следовательно, детали из указанных пластмасс могут подвергаться многократной переработке по мере выхода их из строя и отработке ресурса работы.

К термореактивным полимерам относятся пластмассы на основе фенолформальдегидных композиций (текстолит, волокнит, асботек-

столит, асболокнит), на основе эпоксидных и полиэфирных композиций (стеклопластики). Особенностью этих пластмасс является переход при нагревании сначала в вязкотекучее состояние, а затем в необратимое нерастворимое вещество. При повторном нагреве они не размягчаются, следовательно, не могут подвергаться повторной переработке.

Физико-механические свойства пластмасс существенно зависят от различных добавок. В качестве добавок применяют пластификаторы, стабилизаторы, ускорители отвердевания, красители и др. В табл. 11.6 и 11.7 приведены физико-химические свойства пластмасс, методы их переработки и область применения.

Наиболее распространенными методами изготовления деталей из пластмасс является прессование, литье под давлением, экструзия и вакуумное формование. Достоинством указанных методов изготовления является получение практически готовых изделий, требующих незначительной доработки, включающей удаление заусениц, отрезку литников и разрезку. В качестве исходного материала применяются порошок или предварительно спрессованные таблетки. Основными параметрами процесса прессования являются температура и давление. Следует заметить, что давление прессования зависит от сложности конфигурации изделия. Чем сложнее конфигурация, тем выше давление. Производительность обработки зависит от времени выдержки под давлением при прессовании. Время выдержки зависит от применяемого материала пластмассы и толщины стенок изделия. Ориентировочно время выдержки для пресс-порошков составляет 1 мин на 1 мм толщины стенки изделия, для реактопластов с волокнистым наполнителем – 2 – 3 мин на 1 мм толщины стенки изделия. Литье под давлением применяют для изготовления изделий из термопластов. Специальные литьевые машины имеют нагревательный цилиндр, куда из бункера поступает пластмасса в гранулированном состоянии. В цилиндре пластмасса нагревается до жидкотекучего состояния и усилием плунжера под давлением 50 – 250 мПа выдавливается в охлаждаемую пресс-форму и выдерживается в ней под давлением некоторое время. Пресс-формы охлаждаются проточной водой. Для извлечения деталей из пресс-формы необходимо предусмотреть уклоны на внешних поверхностях не менее 15°, а на внутренних – не менее 30°.

Т а б л и ц а 11.6. Термопласты

Вид пластмасс	Предел прочности, кгс/см ²		Твердость НВ	Коэффициент трения по стали	Метод переработки	Область приме- нения
	при рас- тяжении	при сжа- тии				
Полиформальдегид	700	1300	25 – 30	0,1 – 0,3	Литье под давлением при 210 ± 10°С, давление 100 – 150 мПа,экструзия, прессование	Шестерни, подшипники скольжения, рукоятки
Поликарбонат	670 – 780	900 – 950	15 – 16	0,078 – 0,082	Литье под давлением 220°С, давление 100 — 200 мПа,экструзия	Шестерни, вентиляторы, втулки
Фторопласт	150 – 200	200	3 – 4	0,064 – 0,08	Прессование на воздухе и спекание при 360 – 570°С, давление 30 – 35 мПа	Прокладки, уплотнители, подшипники скольжения
Полиэтилен высокого давления	120 – 160	125	–	0,24	Литье под давлением 150–180°С, давление 50–100 мПа, вальцевание, экструзия, механическая обработка	Арматура трубопроводов
Пенопласт	7,8 – 18	5,5 – 22	–	–	Распыление, заливка	Сидения, прокладки

Таблица 11.7. Реактопласты

Вид пластмасс	Предел прочности, кгс/см ²		Твердость НВ	Коэффициент трения по стали	Метод переработки	Область приме- нения
	при рас- тяжении	при сжа- тии				
Текстолит листовой	650 – 1000	1200 – 1500	25 – 40	0,12 – 0,22	Прессование при Т= 150–165°С, дав- ление 15–30 мПа	Кольца, колод- ки, прокладки
Асботексто- лит марки А и Б	800	850 – 1000	30 – 40	0,05 – 0,3	Горячее прессование Т= 150–165°С, давле- ние 7–15 мПа, меха- ническая обработка	Детали тормоз- ных устройств, прокладки
Асбололок- нит К6, КФ3	250 – 270	850 – 1000	30	0,3	Прессование при Т= 165–175°С, дав- ление 45–15 мПа	Фрикциональ- ные тормозные колодки
Стекло- пластик АГ 4	800 – 5000	1300	26 – 30	0,05 – 0,7	Прессование при Т= 160°С, давление 40–5 мПа	Кронштейны, шквивы, фланцы, шестерни, на- груженные кор- пусные детали

Гладкие и резьбовые отверстия в деталях оформляют с помощью металлических футерок, заформованных в пластмассовую деталь. В конструкциях пластмассовых деталей, помимо резьбовых вставок, могут быть предусмотрены разнообразные армирующие элементы для упрочнения или крепления к другим деталям. Во избежание короблений армирующие элементы размещаются равномерно по всей детали. Для прочности сцепления металлических армирующих элементов с пластмассой предусматривают проточки, рифления или накатку. На рис.11.17 показаны варианты размещения армирующих элементов в пластмассовых деталях.

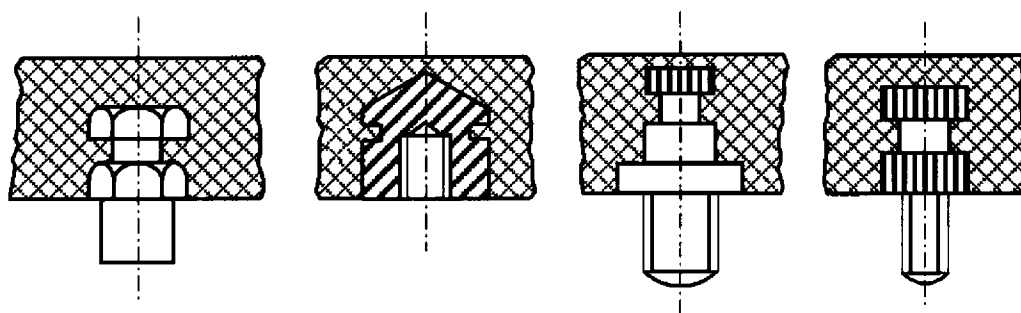


Рис. 11.17. Армирующие элементы в пластмассовых деталях

Экструзия (непрерывное выдавливание) осуществляется на специальных машинах – экструдерах. Экструдер состоит из червячкового пресса (шнек-машины), формующей головки и приемного устройства. Гранулированный термопластичный полимер загружают в бункер машины, откуда он непрерывно поступает в обогреваемый цилиндр, внутри которого вращается шнек с частотой 20 – 100 об/мин. С помощью шнека материал перемешивается и непрерывно перемещается к формующей головке. В процессе перемешивания материал пластмассы нагревается и переходит в жидкотекучее состояние. В этом состоянии пластмасса выдавливается из формующей головки в виде профиля заданного сечения и подвергается интенсивному охлаждению водой. Методом экструзии изготавливают различные профили, трубы, пластины из термопластичных материалов, предназначенные для отделки кузовов автомашин.

Механическая обработка заготовок из пластмасс. Детали из пластмасс получают в большинстве случаев в готовом виде. В ряде случаев требуется обработка резанием. Например, литники удаляются режущими инструментами. При прессовании невозможно получить резьбовые отверстия высокой точности.

При обработке пластмасс следует учитывать их свойства: низкую теплопроводность, абразивную способность, низкую твердость. При обработке некоторых пластмасс резцы изнашиваются более интенсивно по сравнению с обработкой стальных деталей. Резцы нагреваются до высоких температур, а предельно допустимая температура, например, для терморезистивных пластмасс, не должна превышать 160°C , а для термопластичных пластмасс не должна превышать $60 - 100^{\circ}\text{C}$. Износ резцов наиболее интенсивно протекает по задней поверхности. Рекомендуется применять резцы, оснащенные пластинками из твердого сплава ВК. При обработке заготовок из полистирола рекомендуется применение резцов из быстрорежущих или инструментальных легированных сталей.

Сверление является наиболее распространенной операцией обработки заготовок из пластмасс. Процесс стружкообразования имеет общность с процессом стружкообразования при обработке заготовок из серого чугуна. Скорость резания при рациональном периоде стойкости допускается несколько выше, чем при обработке заготовок из стали 40. Например, при точении текстолита резцом, оснащенным пластинкой твердого сплава Р6М5, с глубиной резания $1,5 - 3,0$ мм и подачей $0,2 - 0,3$ мм/об рекомендуемые скорости резания $180 - 400$ м/мин. При обработке волокнита резцом с пластинкой ВК8 скорость резания колеблется от 100 до 600 м/мин. Резцы имеют углы $\alpha = 12 \div 20^{\circ}$ и $\gamma = 10 \div 20^{\circ}$; фрезы имеют углы $\gamma = 0 \div 10^{\circ}$ и $\alpha = 12 \div 20^{\circ}$; сверла имеют угол при вершине $2\varphi = 60 \div 70^{\circ}$ и прямую канавку.

11.5.2. Характеристика металлокерамических материалов и технология изготовления изделий

Методы порошковой металлургии основаны на получении заготовок деталей машин спеканием порошков металлов и сплавов. Детали из металлокерамики используют в узлах трения с ограниченной смазкой и фрикционных механизмах, они успешно работают при высоких температурах. При спекании тонкодисперсных порошков,

сплавов, углерода удается получить композиции из металлов и неметаллических материалов, которые не могут быть получены путем сплавления. За счет подбора исходных компонентов мелкодисперсных порошков можно получить изделия с заданными свойствами.

Металлокерамические изделия подвергаются механической и термической обработке, сварке, пайке, на них можно наносить различные виды покрытий. Эти изделия отличаются повышенной пористостью, благодаря чему возможна их пропитка различными смазочными составами. Это позволяет металлокерамическим деталям длительное время работать без дополнительной смазки, например, в узлах трения колесных и гусеничных машин. Из них изготавливают подшипниковые втулки, вкладыши подшипников, направляющие втулки клапанов, плоские опорные шайбы, шаровые опоры, поршни амортизаторов, поршневые кольца, кулачки и другие антифрикционные детали.

Порошки получают путем электролиза водных растворов или расплавов солей металлов при пропускании через ванну постоянного тока. Охлажденный на катоде металл, имеющий губчатое строение, в дальнейшем подвергается механическому измельчению. Таким образом получают порошки из меди, железа, титана, свинца и др.

Мелкодисперсные порошки получают также путем распыления струи расплавленного металла при помощи воздушной струи, инертного газа и воды с последующим измельчением полученных продуктов механическим путем на размолочных мельницах.

Для изготовления антифрикционных деталей применяют железографит (1 – 3% графита) и бронзографит (9 – 10% олова, 2 – 3% графита, остальное медь). Плотность этих материалов составляет 70 – 80% от плотности основного материала.

Поры деталей из антифрикционных материалов заполняются маслом или расплавленным фторопластом с добавкой дисульфида молибдена. Срок службы подшипников из таких материалов в 10 – 15 раз выше, чем бронзовых.

Укрупненные этапы технологического процесса изготовления металлокерамических деталей:

1. Подготовка исходной порошковой шихты.
2. Формование в специальных прессформах для получения заготовок требуемых размеров и форм.
3. Спекание заготовок.

4. Дополнительная обработка спеченных заготовок в зависимости от предъявляемых требований: калибровка, цементация, закалка, пропитка, механическая обработка.

5. Контроль физико-механического состояния и геометрических размеров.

Подготовка исходной порошковой шихты. Порошковая шихта просеивается на механизированных ситах для получения мелкодисперсных порошков определенного размера. Различные компоненты смешиваются в вибрационных смесителях в течение 2 – 8 часов. Для улучшения процесса прессования в состав порошковой смеси вводятся склеивающие добавки (раствор парафина, воска, каучука и др.), шихта должна быть однородна во всем объеме.

Формообразование. Формообразование выполняется прессованием, литьем, прокаткой в холодном и горячем состоянии. Детали, спрессованные в холодном состоянии, спекают; при горячем прессовании спекание происходит непосредственно в пресс-форме. Прессование выполняется в закрытых пресс-формах при строго определенной дозировке смеси при давлении 150 – 700 мПа. Шихта нагревается до температуры 0,5 – 0,8 температуры плавления порошков. Горячее прессование осуществляется в пресс-формах, изготовленных из графита, твердых сплавов и жаропрочных сталей.

Шихту загружают в пресс-форму, нагревают ТВЧ и при температуре спекания порошков 1150 – 1200°C производят прессование. Одновременный нагрев и давление значительно ускоряют процесс спекания.

Спекание. Спекание придает металлокерамическим заготовкам требуемые физико-механические свойства. При спекании важно предотвратить образование окисных пленок на поверхности частиц металлического порошка. С этой целью спекание выполняют в условиях вакуума или в среде защитных газов (аргоне). Для спекания металлокерамики используют электропечи. При мелкосерийном производстве используют вакуумные и газовые печи. В крупносерийном и массовом производствах используют конвейерные печи непрерывного действия в среде защитного газа. Эти печи по пути перемещения спекаемых изделий имеют три зоны: нагрева, выдержки и охлаждения.

Спрессованные в холодном состоянии заготовки при давлении 600 мПа спекаются при температуре 1140 – 1180°C в защитной среде

в течение 1,0 – 1,5 часа. После спекания заготовки подвергаются отжигу при температуре 900°C и охлаждаются вместе с печью до температуры 640°C.

Технология изготовления деталей методом порошковой металлургии:

1. Распыление порошка из расплава нейтральным газом аргоном.

2. Просеивание порошка акустическим полем для распределения по фракциям.

3. Обработка холодом под большим давлением, в результате которой частица рекристаллизуется, переходя в сверхмелкозернистую структуру.

4. Перемешивание и гомогенизация порошка в атмосфере аргона во вращающихся сосудах.

5. Перенос порошка в оболочковые формы из стекловидных материалов. Формы работают в широком интервале температур и разрушаются после прессования.

6. Электродинамическая дегазация в вакуумных камерах. Порошок тонкой струей проходит через камеру и полностью дегазируется в течение нескольких секунд.

7. Из дегазатора порошок подается в формы, в которых предварительно создан вакуум.

8. Производится предварительный нагрев.

9. Производится горячее изостатическое прессование в автоклаве-резервуаре высокого давления, в котором находятся нагревательные элементы. Максимальное давление в автоклаве 100 мПа, температура 1300°C.

10. После окончания цикла спекания детали извлекаются из автоклава. В процессе охлаждения материал оболочки теряет пластичность, сжимается и под воздействием возникающих напряжений разрушается.

11. Дальнейшая обработка полученной заготовки зависит от требований, которые диктуются условиями эксплуатации.

Например, после спекания зубчатых колес заготовку подвергают отжигу в защитной среде при температуре 900°C и охлаждают вместе с печью. На внутришлифовальном станке обрабатывается отверстие, которое является установочной базой для последующей обработки. Производится цементация, закалка и шлифование зубчатого венца.

Технологический процесс изготовления железграфитовых подшипниковых втулок включает прессование заготовки при давлении 500 – 600 мПа, спекание в среде защитных газов при температуре 1120 – 1150°С в течение 1,5 часа, пропитку маслом в масляной ванне при температуре 120 – 130°С в течение 40 – 90 мин и калибровку внутреннего диаметра.

ЛИТЕРАТУРА

1. Якимов О.В., Новиков Ф.В., Новиков Г.В., Якимов О.О. Високопродуктивне шліфування: Навчальний посібник. – К.: ІСДО, 1996. – 180с.
2. Якимов О.В., Гусарев В.С., Якимов О.О., Лінчевський П.А. Технологія автоматизованого машинобудування: Підручник. – К.: ІСДО, 1994. – 400 с.
3. Новиков Ф.В., Якимов А.А., Новиков Г.В. и др. Тепловые и механические процессы при резании металлов: Учебное пособие. – Одесса: ОГПУ, 1997. – 179 с.
4. Якимов А.В., Новиков Ф.В., Новиков Г.В., Якимов А.А. Теория и прогрессивные технологии глубинного шлифования: Учебное пособие. – Харьков, 1995. – 102 с.
5. Воронцов А.П., Мурзаков Х.Е. Влияние тепловых деформаций на технологическую надежность токарно-револьверных станков. //Станки и инструменты. – 1982. – №10. – С.5 – 8 .
6. Пронников А.С. Надежность машин. – М.: Машиностроение, 1978. – 480 с.
7. Маталин А.А. Технология машиностроения: //Учебник. – Л.: Машиностроение. Ленинград. отд-ние, 1985. – 496 с.
8. Якимов О.В., Новиков Ф.В., Новиков Г.В., Якимов О.О. Алмазна обробка: Учбовий посібник – К.: ІЗМН, 1996. – 168 с.
9. Якимов А.В., Смирнов Л.П., Бояршинов Ю.А. и др. Качество изготовления зубчатых колес. – М.: Машиностроение. – 1979. – 191 с.
10. Якимов А.В., Слабодяник П.Т., Усов А.В. Теплофизика механической обработки: Учебное пособие. – К., Одесса: Лыбидь. – 1991. – 240 с.
11. Балакшин Б.С. Основы технологии машиностроения. – М.: Машиностроение, 1969. – 359 с.
12. Гельгаг Ю.И. Сборник задач и упражнений по технологии машиностроения. – М.: Высшая школа, 1986. – 268 с.

13. Мордвинов В.С., Пантюхова И.В., Подкорытова Р.Г. и др. Расчет технологических размеров и погрешностей установки заготовки: Учебное пособие. – Омск: ОПИ, 1979. – 79 с.
14. Зелинский А.Н. Основы математического моделирования: Учебное пособие. – К.: УМК. ВО, 1991. – 227 с.
15. Мордвинов Б.С. Исследование геометрических структур в применении методов теории графов // Известия вузов, Машиностроение.– 1965.-№ 3 . – С.12 – 15.
16. Якимов А.В., Линчевский П.А., Якимов А.А. Обоснование маршрута обработки и размерный анализ технологических процессов: Учебное пособие. – К.: НМК. ВО, 1993. – 128 с.
17. Якимов А.В., Гусарев В.С., Якимов А.А., Линчевский П.А. Технология автоматизированного машиностроения: Учебник. – К.: УСДО, 1993. – 440 с.
18. Маталин А.А. Точность механической обработки и проектирование технологических процессов. – М.: Машиностроение, 1970. – 390 с.
19. Сипайлов В.Л. Тепловые процессы при шлифовании и управление качеством поверхности. – М.: Машиностроение, 1978. – 167 с.
20. Якимов А.В., Новиков Ф.В., Новиков Г.В., Якимов А.А. Качество и производительность абразивно-алмазной обработки.: Учебное пособие. – Одесса: ОГПУ, 1999. – 212 с.
21. Карслоу К. и Егер Д. Теплопроводность твердых тел. – М.: Наука, 1964. – 487 с.
22. Резников А.Н. Теплофизика резания. – М., Машиностроение, 1969. – 288 с.
23. Маталин А.А. Технология машиностроения: Учебник. – Л., Машиностроение, 1985. – 496 с.
24. А.С. №948647 (СССР) Шлифовальный круг. Прокофьев В.М., Якимов А.В. Опубл. в БИ №29 от 07.08.82.
25. Рыжов Э.В. Технологические методы повышения износостойкости деталей машин. – К.: Наукова думка, 1984. – 272 с.
26. Якимов А.В. Прерывистое шлифование. – К.: Вища школа, 1986. – 173 с.
27. Серебровский В.Б. Качество поверхности деталей машин.– М., – Москва: – Свердловск, 1962. – 56 с.

28. Якимов А.В., Ларшин В.П., Якимов А.А. и др. Оптимизация технологических процессов в машиностроении: Учебное пособие. – К., 1995. – 105с.
29. Рыжов Э.В., Аверченков В.И. Оптимизация технологических процессов механической обработки. – К.: Наукова думка, 1989.– 187с.
30. Ларшин В.П. Исследование производительности шлифования резьбы ходовых винтов и разработка предпосылок для автоматизации процесса. Дис. ...канд. техн. наук. – Одесса, 1980. – 230 с.
31. Капустин Н.М. Технология производства гусеничных и колесных машин: Учебное пособие для машиностроительных вузов. – М.: Машиностроение, 1978. – 344 с.
32. Якимов А.В. Оптимизация процесса шлифования. – М.: Машиностроение, 1975. –176 с.
33. Силин С.С. Хрульков В.А. Лобанов А.В. и др. Глубинное шлифование из труднообрабатываемых материалов. – М.: Машиностроение, 1984. – 64 с.
34. Общемашиностроительные нормативы времени на слесарную обработку и слесарно-сборочные работы по сборке машин. Серийное производство. – М.: Машиностроение, 1968. – 219 с.
35. Пуховский Е.С. Технологические основы гибкого автоматизированного производства: Учебное пособие. – К.: Вища школа, 1989. – 240 с.
36. Гибкие производственные комплексы // Под редакцией Беянина П.Н. и Лещенко В.А. – М.: Машиностроение, 1984. – 384 с.
37. Макаров И.М. Системные принципы создания гибких автоматизированных производств. – М.: Высшая школа, 1986. – 175 с.
38. Справочник технолога №2. // Под редакцией Косиловой А.Г. и Мещерякова Р.К. – М.: Машиностроение, 1986. – 495 с.
39. Бобров В.Ф. Основы теории резания металлов. – М.: Машиностроение, 1975. – 224 с.
40. Сикора Е. Оптимизация процессов обработки резанием с применением вычислительных машин. – М.: Машиностроение. 1983. – 226 с.
41. Кулаков Ю.М., Хрульков В.А., Дунин-Барковский И.В. Предотвращение дефектов при шлифовании. – М.: Машиностроение, 1975. – 144 с.

42. Воробьев Б.М., Бурчаков В.С., Шибиев Е.В. Надежность технологических схем и процессов в угольных шахтах. – М.: Недра, 1975. – 238 с.
43. Крагельский И.В. Трение и износ. – М.: Машгиз, 1962. – 383 с.
44. А.С. №1117194 (СССР) Способ шлифования детали. Свирщев В.И., Степанов Ю.Н.. Заявл. 08.07.83 №361577/25-08, опубл. в БИ, 1984. №37.
45. Свирщев В.И. Способ исключения возникновения остаточных напряжений в поверхностном слое шлифуемых деталей. //Совершенствование процессов абразивно-алмазной и упрочняющей обработки в машиностроении. Пермский политехнический институт. – Пермь, 1987. – 123 с.
46. Подзей А.В. Технологические остаточные напряжения. – М.: Машиностроение, 1973. – 216 с.
47. Якимов А.В., Свирщев В.И., Паршаков А.Н., Ларшин В.П. Управление процессом шлифования. – К.: Техника, 1983. – 184 с.
48. Бояршинов Ю.А. Разработка и исследование способов повышения качества поверхностного слоя при шлифовании высокоточных зубчатых колес. Дис. ... канд. техн. наук. – Пермь, 1970. – 250 с.
49. Дальский А.М. Технологическое обеспечение надежности высокоточных деталей. – М.: Машиностроение, 1975. – 224 с.
50. Ящерицын П.И., Рыжов Э.В. Аверчиков В.И. Технологическая наследственность в машиностроении. – Минск, Наука и техника, 1977. – 225 с.
51. Гаркунов Д.Н. Триботехника: Учебник для студентов вузов – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение. 1989. – 328 с.
52. Бердник В.В., Мамай А.В. Электроабразивное шлифование. – Киев: Техника, 1981. – 64с.
53. Бирюков Б.Н. Электрофизический и электрохимический методы размерной обработки. – М.: Машиностроение, 1981. – 127 с.
54. Руденко П.А., Шуба М.Н., Огнивец В.А. и др. Отделочные операции в машиностроении: Справочник. // Под общ. редакцией П.А. Руденко. – К.: Техника, 1985. – 136 с.
55. Евстегнеев М.И., Подзей А.В., Сулима А.М. Технология производства двигателей летательных аппаратов: Учебник для авиационных вузов. – М.: Машиностроение, 1982. – 260 с.

56. Романовский В.П., Мовшович И.Я., Долгов А.А. Исследование стойкости режущих элементов универсально сборных штампов для вырубки – пробивки. //Кузнечно-штамповочное производство. 1970. – №6.– С. 16 – 19.
57. Гриднев В.Н. Превращения при нагреве // Труды ВНИТОМАШ, Metallovedenie i termicheskaya obrabotka. – Mashgiz, 1955. – 305с.
58. Садовский В.Д. и др. Фазовые и структурные превращения при нагреве стали. // Труды ВНИТОМАШ, Metallovedenie i termicheskaya obrabotka. – Mashgiz. 1955. – 305 с.
59. Костецкий Б.И. Структура и свойства поверхности при шлифовании стали. // Труды семинара по качеству поверхности, сб. №5 АН СССР, 1961. – С.13 – 18.
60. Якимов А.А. Основы теории обеспечения и стабилизации качества поверхностного слоя при прерывистом шлифовании зубчатых колес. – ОГПУ, 1997. – 212 с.
61. Ложкина Л.А. Температурный режим тонкостенных деталей при шлифовании. Абразивно-алмазная обработка. – Пермь, 1983. – С. 17 – 20.
62. Аксенов В.А., Чесов Ю.С. Моделирование тепловых явлений при механической обработке. Новосибирский электротехнический институт. – Новосибирск. 1990. – 68 с.
63. Федюкин К.В. Термоциклическая обработка сталей и чугунов. – Л., 1977. – 124 с.
64. Сагарадзе В.С. Повышение надежности цементируемых деталей. –М.: Машиностроение, 1975. – 114 с.
65. Генкин М.Д., Рыжов М.А., Рыжов Н.М. Повышение надежности тяжело-нагруженных зубчатых колес. – М.: Машиностроение, 1981. – 232 с.
66. Ларшин В.П., Лищенко Н.В. Особенности разработки технологических процессов для условий малолюдного и безлюдного производства. Проблемы теории и практики технологии машиностроения механической и физико-технической обработки: Материалы конференции. – Харьков, 2000. – С. 21 – 25.
67. Дьяченко П.Е., Якобсон М.О. Качество поверхности при обработке металлов резанием. – М.: Mashgiz, 1951. – 220 с.
68. Торлин В.Н., Баталин А.С. Финишные операции в гибком автоматизированном производстве. – К.: Техника, 1987. – 208 с.

69. Островский В.И. Теоретические основы процесса шлифования. – Л.: Изд-во Ленинград. ун-та, 1981. – 144 с.
70. Королев А.В. Исследование процессов образования поверхностей инструмента и детали при абразивной обработке. – Саратов. Изд. Саратов. ин-та, 1975. – 202 с.
71. Капанец Э.Ф., Кузьмич К.К. и др. Точность обработки при шлифовании. – Наука и техника, 1987. – 152 с.
72. Колуэлл. Эффективность высокочастотной вибрации. // T a A ME. – 1956. 78. – №4 С. 837 – 844.
73. Колуэлл. Влияние высокочастотных вибраций на процесс шлифования. // T a A ME. – 1955. 87. – №2243. – С. 1131 – 1136.
74. Старков В.Н. Обработка резанием. Управление стабильностью и качеством в автоматизированном производстве. – М.: Машиностроение, 1989. – 296 с.
75. Маслов Е.Н. Теория шлифования металлов. – М.: Машиностроение, 1974. – 320 с.
76. Розенберг А.М., Еремин А.Н. Элементы теории резания металлов. – М.: Машгиз, 1966. – 423 с.
77. Островский В.И. Усовершенствование абразивного инструмента для шлифования труднообрабатываемых материалов. – Л., 1973. – 80 с.
78. Свирщев В.И. Технологические основы и обеспечение динамической стабилизации процессов шлифования. Автореферат докторской диссертации. – Пермь. 1996. – 38 с.
79. Кузнецов В.Д. Физика твердого тела. – Томск: Полиграфиздат, 1947. – Т.4.
80. Кудинов В.К. Динамика станков. – М.: Машиностроение, 1967. – 357 с.
81. Кучма Л.К. Вибрации при обработке на фрезерных станках и методы их гашения. – М.: Изд-во АН СССР, 1959. – 122 с.
82. Сридхар, Хок, Лонг. К вопросу об автоколебаниях в металлорежущих станках. // Конструирование и технология машиностроения. Тр. американск. Общ-ва инженеров-механиков. М.: Мир. – 1973. №2 – С. 141 – 146.
83. Патент США №3707956. Способ и устройство для фасонной правки периферии шлифовального круга. / Генри Ф. Свенсон. – Оpubл. в бюллетене "Изобретения за рубежом". 1973. №1.

84. Кузьмин П.А. Малые колебания и устойчивость движения. – М.: Наука, 1973. – 208 с.
85. Тимошенко С.П. Колебания в инженерном деле. – М.: Физматгиз, 1959. – 439 с.
86. Силин С.С. Расчет температурных полей при действии движущихся источников тепла.//Инженерно-физический журнал.– 1963. – №12. – С. 15 – 19.
87. Стефаненков П.Н. Исследование и разработка способа нанесения регулярного рельефа на поверхность шлифовального круга при правке за счет возбуждения автоколебаний правящего инструмента: Автореферат канд. диссертации. – Одесса. – 1982. - 19с.
88. Гусарев В.С. Энергетическая эффективность технологических процессов.// Авиационно-космическая техника и технология. Вып. 14. – Харьков: ГАКУ им. Жуковского, – 2000. – С. 40 – 44.
89. Гусарев В.С. Технологическая энергоэкономика // Вестник инженерной академии Украины.– К., 2001.– С. 352 – 356.
90. Фадеев В.А. Научный подход к выбору оптимальных способов и условий финишной обработки агрегатов авиационной техники // Труды государственного аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского, ХАИ, Вып. 14.– Харьков, 2000. – С. 37 – 40.
91. Якимов А.В., Новиков Ф.В. Теоретическое обоснование условий повышения эффективности технологии машиностроения // Вісник інженерної академії України. – Киев, 2000. – С.13 – 16.
92. Гусев А.А., Ковальчук Е.Р., Колесов И.М. и др. Технология машиностроения : Учебник для машиностроительных специальностей вузов.– М.: Машиностроение, 1986. – 480 с.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1

$$\Phi(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^t e^{-\frac{t^2}{2}} dt$$

t	$\Phi(t)$	t	$\Phi(t)$	t	$\Phi(t)$	t	$\Phi(t)$	t	$\Phi(t)$
0,00	0,0000	0,26	0,1026	0,52	0,1985	1,05	0,3531	2,60	0,4953
0,01	0,0040	0,27	0,1064	0,54	0,2054	1,10	0,3643	2,70	0,4965
0,02	0,0080	0,28	0,1103	0,56	0,2123	1,15	0,3749	2,80	0,4974
0,03	0,0120	0,29	0,1141	0,58	0,2190	1,20	0,3849	2,90	0,4981
0,04	0,0160	0,30	0,1179	0,60	0,2257	1,25	0,3944	3,00	0,49865
0,05	0,0199								
		0,31	0,1217	0,62	0,2324	1,30	0,4032	3,20	0,49931
0,06	0,0239	0,32	0,1255	0,64	0,2389	1,35	0,4115	3,40	0,49966
0,07	0,0279	0,33	0,1293	0,66	0,2454	1,40	0,4192	3,60	0,499841
0,08	0,0319	0,34	0,1331	0,68	0,2517	1,45	0,4265	3,80	0,499928
0,09	0,0359	0,35	0,1368	0,70	0,2580	1,50	0,4332	4,00	0,499968
0,10	0,0398								
		0,36	0,1406	0,72	0,2642	1,55	0,4394	4,50	0,499997
0,11	0,0438	0,37	0,1443	0,74	0,2703	1,60	0,4452	5,00	0,49999999
0,12	0,0478	0,38	0,1480	0,76	0,2764	1,65	0,4505		
0,13	0,0517	0,39	0,1517	0,78	0,2823	1,70	0,4554		
0,14	0,0557	0,40	0,1554	0,80	0,2881	1,75	0,4599		
0,15	0,0596								
		0,41	0,1591	0,82	0,2939	1,80	0,4641		
0,16	0,0636	0,42	0,1628	0,84	0,2995	1,85	0,4678		
0,17	0,0675	0,43	0,1654	0,86	0,3051	1,90	0,4713		
0,18	0,0714	0,44	0,1700	0,88	0,3106	1,95	0,4744		
0,19	0,0753	0,45	0,1736	0,90	0,3159	2,00	0,4772		
0,20	0,0793								
		0,46	0,1762	0,92	0,3212	2,10	0,4821		
0,21	0,0832	0,47	0,1808	0,94	0,3264	2,20	0,4861		
0,22	0,0871	0,48	0,1844	0,96	0,3315	2,30	0,4893		
0,23	0,0910	0,49	0,1879	0,98	0,3365	2,40	0,4918		
0,24	0,0948	0,50	0,1915	1,00	0,3413	2,50	0,4938		
0,25	0,0987								

Приложение 2

Минимальные припуски на черновое обтачивание, растачивание и фрезерование заготовок, полученных горячей штамповкой, мм

Диаметр заготовки	Припуск на размер при длине				
	до 120	свыше 120 до 260	свыше 260 до 500	свыше 500 до 800	свыше 800 до 1250
До 50	1,7	2,0	2,4	2,8	3,2
Свыше 50 до 120	2,0	2,2	2,6	2,9	3,3
“ ” 120 до 160	2,2	2,4	2,7	3,0	3,4
“ “ 260 до 500	2,5	2,7	2,8	3,1	3,5

Примечания: 1. Для штамповок из алюминиевых, магниевых и медных сплавов, а также для черного проката повышенной точности припуски умножают на 0,8.

2. Припуски на все поверхности штамповки принимаются с учетом максимальных габаритных размеров.

3. При закреплении заготовки в патроне длина равна удвоенному расстоянию от наиболее удаленного торца до кулачков патрона.

Приложение 3

Минимальные припуски на черновое обтачивание и растачивание поверхностей в отливках, мм

Максимальный габаритный размер отливки	Литье заготовок в песчаные формы	Литье заготовок в кокиль и оболочные формы
	Диаметр, мм	
До 50	2,2	1,4
Свыше 50 до 120	2,6	1,6
“ ” 120 до 260	3,3	1,8
“ ” 120 до 260	4,1	2,0
“ ” 120 до 260		

Примечание. Припуски на все поверхности отливки выбирают с учетом максимального размера (диаметра или длины).

Приложение 4

Минимальные припуски на чистовое обтачивание, фрезерование после черного или калиброванного проката, мм

Диаметр или толщина, мм	Длина деталей							
	до 120	св.120 до 260	св.260 до 500	св.500 до 800	до 120	св.120 до 260	св.260 до 500	св.500 до 800
	термически необработанных				термически обработанных			
До 50	0,5	0,6	0,8	1,0	0,8	1,0	1,2	1,4
Св. 50 до 120	0,6	0,7	0,9	1,1	0,85	1,1	1,2	1,5
“ ” 120 до 500	0,7	0,8	1,0	1,2	0,9	1,1	1,3	1,6

Приложение 5

Минимальные припуски на наружное шлифование деталей (в центрах и безцентровое), мм

Диаметр или толщина, мм	Расчетная длина деталей							
	до 120	св.120 до 260	св.260 до 500	св.500 до 800	до 120	св.120 до 260	св.260 до 500	св.500 до 800
	термически необработанных				термически обработанных			
До 18	0,15	0,18	0,25	—	0,18	0,22	0,3	—
Св. 18 до 50	0,18	0,22	0,28	0,35	0,2	0,28	0,35	0,5
“ ” 50 до 120	0,2	0,25	0,3	0,4	0,25	0,35	0,4	0,55
“ ” 120 до 500	0,25	0,3	0,35	0,45	0,3	0,4	0,5	0,65

- Примечания: 1. К термически обработанным относят детали, которые прошли термическую обработку после чистового обтачивания.
2. Если шлифование выполняется за две операции, то на предварительное шлифование отводится $2/3$ припуска, а на окончательное — $1/3$.
3. При обработке в центрах расчетная длина равна длине детали. При обработке в патроне расчетная длина равна удвоенному расстоянию от торца до конца обрабатываемого участка вала.

Приложение 6

Минимальные припуски на чистовое растачивание, зенкерование и развертывание отверстий

Диаметр отверстия, мм	Чистовое растачивание, зенкерование	Развертывание
До 10	–	0,12
Свыше 10 до 30	0,5	0,16
“ ” 30 до 50	0,6	0,2
“ ” 50 до 120	0,9	–
“ ” 120 до 500	1,2	–

Примечание. Если развертывание выполняется на двух переходах или операциях, то на предварительное развертывание отводится 2/3 припуска, на окончательное – 1/3.

Приложение 7

Минимальные припуски на шлифование отверстий после чистового растачивания, мм

Диаметр, мм	Термически необработанные и обработанные жесткие детали	Термически обработанные нежесткие детали
До 50	0,2	0,25
Свыше 50 до 120	0,25	0,35
“ ” 120 до 260	0,35	0,5
“ ” 260 до 500	0,4	0,7

Примечание. Термически обработанными считаются детали, которые прошли термическую обработку после чистового растачивания и перед операцией шлифования.

Приложение 8

Минимальные припуски на протягивание отверстий, мм

Диаметр, мм	Отверстия подготовленные	
	по 9–11-му качеству точности (после чистового растачивания)	по 12-му качеству точности
До 30	0,35	0,45
Свыше 30 до 50	0,40	0,55
“ ” 50 до 80	0,50	0,7

Приложение 9

Минимальные припуски на тонкое (алмазное) растачивание, мм

Диаметр отверстий, мм	Предварительное тонкое однократное растачивание по 9–10-му качеству точности				Окончательное растачивание – все материалы
	Легкие сплавы	Баббит	Бронза чугун	Сталь	
До 50	0,2	0,25	0,15	0,12	0,05
Свыше 50 до 500	0,3	0,35	0,25	0,15	0,08

Приложение 10

Минимальные припуски на черновое подрезание торцов, фрезерование и строгание плоскостей

Максимальный габаритный размер	Сталь, полученная горячей штамповкой	Литье в песчаные формы	Цветные и титановые сплавы, полученные штамповкой	Литье в кокиль, оболочковые формы
До 50	0,9	1,1	0,7	0,6
Свыше 50 до 120	1,0	1,1	0,8	0,7
“ ” 120 до 260	1,2	1,3	0,9	0,8
“ ” 260 до 500	1,5	1,6	1,1	1,0

Приложение 11

Минимальные припуски на чистовое подрезание торцов и на чистовое фрезерование плоскостей

Диаметр или ширина А	Припуск
До 50	0,3
Свыше 50 до 120	0,4
“ ” 120 до 260	0,55
“ ” 260 до 500	0,7

Приложение 12

Минимальные припуски на шлифование и тонкое фрезерование торцов и плоскостей после чистового подрезания и фрезерования (по вариантам)

Длина обработки, мм	Шлифование и фрезерование термически не обработанных деталей	Шлифование термообработанных деталей	Предварительное шлифование до термообработки	Окончательное шлифование после термообработки	Шлифование после термообработки	
					предварительное	окончательное
До 30	0,10	0,15	0,10	0,07	0,07	0,05
Свыше 30 до 120	0,15	0,20	0,15	0,15	0,15	0,07
“ ” 120 до 260	0,20	0,30	0,20	0,25	0,20	0,10
“ ” 260 до 500	0,30	0,45	0,30	0,35	0,30	0,15

Приложение 13

Минимальные припуски на обработку зубчатого венца прямозубых зубчатых колес

Модуль	Чистовое фрезерование, долбление, строгание	Шлифование	Шевингование
До 2	0,25	0,2	0,05
Свыше 2 до 3	0,4	0,25	0,07
“ ” 3 до 5	0,5	0,3	0,10
“ ” 5 до 7	0,6	0,35	0,12
“ ” 7 до 10	0,7	0,4	0,15

Допуски на диаметры валов и отверстий, а также линейные размеры

Номинальные размеры	Квалитет точности								
	6-й	7-й	9-й	10-й	11-й	12-й	14-й	15-й	16-й
Свыше 1 до 3	0,01	0,014	0,02	0,04	0,06	0,12	0,25	0,40	0,6
« « 3 « « 6	0,013	0,018	0,025	0,048	0,08	0,16	0,3	0,48	0,75
« « 6 « « 10	0,016	0,022	0,03	0,058	0,10	0,20	0,36	0,58	0,9
« « 10 « « 18	0,019	0,027	0,035	0,070	0,12	0,24	0,43	0,70	1,1
« « 18 « « 30	0,023	0,033	0,045	0,088	0,14	0,28	0,52	0,84	1,3
« « 30 « « 50	0,027	0,039	0,050	0,10	0,17	0,34	0,62	1,00	1,6
« « 50 « « 80	0,030	0,046	0,060	0,12	0,20	0,40	0,74	1,20	1,9
« « 80 « « 120	0,035	0,054	0,070	0,14	0,23	0,46	0,87	1,40	2,2
« « 120 « « 180	0,040	0,063	0,08	0,16	0,26	0,53	1,00	1,60	2,5
« « 180 « « 260	0,045	0,073	0,09	0,185	0,30	0,60	1,15	1,90	2,9
« « 260 « « 360	0,050	0,084	0,100	0,215	0,34	0,68	1,35	2,20	3,3
« « 360 « « 500	0,060	0,095	0,120	0,250	0,38	0,76	1,55	2,50	3,8
« « 500 « « 630	0,07	0,110	0,140	0,280	0,45	0,90	1,80	2,8	4,5
« « 630 « « 800	0,08	0,120	0,150	0,30	0,50	1,00	2,00	3,0	5,0
« « 800 « « 1000	0,09	0,130	0,170	0,35	0,55	1,10	2,20	3,5	5,5

Значение функции $ierfc(x)$

x	$ierfc(x)$	x	$ierfc(x)$	x	$ierfc(x)$
0,0	0,5642	0,28	0,3278	0,62	0,1482
0,01	0,5542	0,29	0,3210	0,64	0,1407
0,02	0,5444	0,30	0,3142	0,66	0,1335
0,03	0,5350	0,31	0,3075	0,68	0,1265
0,04	0,5251	0,32	0,3010	0,70	0,1201
0,05	0,5156	0,33	0,2945	0,72	0,1138
0,06	0,5062	0,34	0,2882	0,74	0,1077
0,07	0,4969	0,35	0,2819	0,76	0,1020
0,08	0,4878	0,36	0,2758	0,78	0,0965
0,09	0,4787	0,37	0,2722	0,80	0,0912
0,10	0,4698	0,38	0,2637	0,82	0,0861
0,11	0,4610	0,39	0,2579	0,84	0,0813
0,12	0,4523	0,40	0,2521	0,86	0,0767
0,13	0,4437	0,41	0,2465	0,88	0,0724
0,14	0,4352	0,42	0,2409	0,90	0,0682
0,15	0,4268	0,43	0,2354	0,92	0,0642
0,16	0,4186	0,44	0,2300	0,94	0,0605
0,17	0,4104	0,45	0,2247	0,96	0,0569
0,18	0,4024	0,46	0,2195	0,98	0,0535
0,19	0,3944	0,47	0,2144	1,0	0,0503
0,20	0,3866	0,48	0,2094	1,1	0,0365
0,21	0,3789	0,49	0,2045	1,2	0,0260
0,22	0,3713	0,50	0,1996	1,3	0,0183
0,23	0,3638	0,52	0,1902	1,4	0,0127
0,24	0,3564	0,54	0,1811	1,5	0,0086
0,25	0,3491	0,56	0,1724	1,7	0,0038
0,26	0,3419	0,58	0,1640	1,9	0,0016
0,27	0,3348	0,60	0,1559	2,0	0,0010

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие.....	3
Введение.....	5
Глава 1. Объект производства, способы получения заготовок и виды технологических процессов.....	10
1.1. Основные понятия и определения.....	10
1.2. Виды операций и этапы технологического процесса.....	13
1.3. Выбор заготовок и способы их получения.....	14
1.4. Припуски на обработку.....	17
1.5. Виды производств.....	23
1.6. Объект производства машиностроительного завода.....	31
1.7. Виды технологических процессов.....	33
1.7.1. Типизация технологических процессов.....	33
1.7.2. Групповой технологический процесс.....	35
1.7.3. Общие принципы построения единичных технологических процессов.....	37
Глава 2. Точность обработки.....	43
2.1. Общий подход к анализу точности обработки....	43
2.2. Влияние износа режущего инструмента на точность обработки.....	45
2.3. Методы определения жесткости станков.....	51
2.4. Расчет упругих перемещений в технологической системе.....	56
2.5. Упругие перемещения при абразивной обработке	64
2.6. Влияние динамики процесса резания на точность обработки.....	70
2.7. Формирование точности обработки.....	76
2.8. Влияние химико-термической обработки на точность деталей.....	81
2.9. Управление точностью процесса обработки.....	84

2.10.	Определение точности изготовления деталей методом математической статистики.....	92
2.10.1.	Закон нормального распределения (закон Гауса).....	96
2.10.2.	Закон равнобедренного треугольника (закон Симпсона).....	98
2.10.3.	Закон эксцентриситета (закон Релея).....	98
2.10.4.	Закон равной вероятности.....	99
2.10.5.	Композиции законов распределения и суммирование погрешностей.....	100
2.11.	Практическое применение законов распределения размеров для анализа точности обработки...	103
2.11.1.	Установление надежности обработки заготовок без брака.....	103
2.11.2.	Определение количества вероятного процента бракованных деталей.....	104
2.11.3.	Определение количества заготовок, требующих дополнительной обработки.....	108
2.11.4.	Статистическое регулирование технологического процесса.....	109
2.12.	Методы настройки станков и обеспечение точности механической обработки.....	111
Глава 3.	Базирование и базы в машиностроении.....	118
3.1.	Базирование и закрепление заготовок.....	118
3.2.	Виды баз.....	123
3.3.	Принцип совмещения баз.....	126
3.3.1.	Общие понятия о совмещении баз.....	126
3.3.2.	Влияние принципа совмещения баз на последовательность обработки поверхностей.....	129
3.4.	Принцип постоянства баз.....	132
Глава 4.	Технологические размерные цепи.....	140
4.1.	Расчеты размерных цепей.....	140
4.2.	Размерный анализ технологических процессов..	149
4.3.	Определение диаметральных операционных размеров вала с помощью графов.....	155

4.4.	Обоснование маршрута и размерный анализ технологического процесса корпусной детали...	156
Глава 5.	Качество обрабатываемой поверхности.....	160
5.1.	Общие сведения о формировании и строении поверхностного слоя деталей.....	160
5.2.	Стандартизация шероховатости поверхности.....	162
5.3.	Приборы для измерения шероховатости поверхности.....	167
5.4.	Причины образования шероховатостей на обработанной поверхности.....	169
5.5.	Причины возникновения шлифовочных трещин.....	172
5.6.	Влияние химического состава плавки на возникновение шлифовочных трещин.....	175
5.7.	Влияние процесса обработки на физико-механическое состояние поверхностного слоя деталей.....	176
5.8.	Термомеханические процессы, протекающие в поверхностном слое деталей при алмазно-абразивной обработке.....	180
5.8.1.	Постановка тепловых задач.....	182
5.9.	Влияние качества поверхностного слоя на эксплуатационные характеристики деталей машин.....	190
5.9.1.	Влияние качества поверхности на износостойкость трущихся поверхностей.....	190
5.9.2.	Влияние качества поверхности на прочность и коррозионную стойкость деталей.....	193
5.10.	Конструкторско-технологическая стабилизация качества поверхностного слоя.....	195
5.10.1.	О механизме структурных превращений при шлифовании.....	195
5.10.2.	Влияние неравномерности распределения припуска на качество поверхностного слоя.....	198
5.10.3.	Влияние параметров термических циклов на качественные характеристики поверхностного слоя деталей.....	205

5.11.	Методы обеспечения качества поверхностного слоя деталей.....	208
5.11.1.	Сущность процесса прерывистого шлифования.....	208
5.11.2.	Эффективность процесса прерывистого шлифования.....	210
5.11.3.	Режущая способность прерывистых кругов.....	216
5.11.4.	Методика расчета геометрических параметров прерывистых кругов.....	218
5.11.5.	Условия возникновения параметрического резонанса и определение областей неустойчивости работы упругой системы станка 3Г71.....	222
5.12.	Обеспечение динамической стабилизации параметров процесса обработки деталей.....	227
5.12.1.	Проблема обеспечения динамической стабильности параметров процесса шлифования.....	227
5.12.2.	Влияние контактных явлений на динамическую нестабильность процесса шлифования.....	231
5.12.3.	Конструкторско-технологическая стабилизация динамики взаимодействия инструмента с деталью и ее влияние на параметры процесса.....	239
5.12.4.	Способы формирования регулярного макро-рельефа на рабочей поверхности шлифовально-го круга.....	244
5.12.5.	Динамика изменения температуры при шлифовании винтовыми прерывистыми кругами.....	248
Глава 6.	Технологическое обеспечение качества изделия....	254
6.1.	Качество продукции.....	254
6.2.	Работоспособность и надежность машин.....	255
6.3.	Причины, вызывающие преждевременный выход из строя деталей машин	259
6.4.	Связь геометрических параметров обрабатываемой поверхности с эксплуатационными свойствами деталей машин.....	261
6.5.	Физика отказов.....	265
6.6.	Надежность технологического процесса изготовления машин.....	269

6.7.	Оптимальное распределение припуска по проходам	272
6.8.	Выбор и обоснование условий обработки, обеспечивающих стабилизацию напряженности поверхностного слоя материала	285
6.9.	Влияние термической обработки на физико-механические свойства материала деталей машин.....	287
6.10.	Химико-термическая обработка в структуре технологического процесса.....	291
6.10.1.	Цементация.....	292
6.10.2.	Азотирование.....	292
6.10.3.	Цианирование.....	293
6.11.	Химическая обработка поверхностей деталей....	294
6.12.	Технологические способы повышения износостойкости деталей.....	296
6.13.	Технологические методы обеспечения оптимальных параметров поверхностного слоя с учетом условий эксплуатации.....	298
6.13.1.	Деформационное упрочнение поверхностного слоя.....	299
6.13.2.	Поверхностно-термическая обработка.....	301
6.13.3.	Диффузионные покрытия.....	302
6.13.4.	Покрытие напылением.....	303
Глава 7.	Оптимизация технологических процессов.....	306
7.1.	Общие положения.....	306
7.2.	Составление модели объекта и алгоритма оптимизации.....	310
7.3.	Поиск оптимальных технологических решений в условиях неопределенности.....	313
7.4.	Оптимизация технологических параметров с использованием геометрического программирования.....	319
7.5.	Оптимизация технологических параметров с использованием функции Лагранжа.....	322
7.6.	Нахождение экстремума функции.....	324

7.7.	Применение метода линейного программирования для решения технологических задач.....	326
7.7.1.	Оптимизация технологической себестоимости изготовления масляного бака.....	326
7.8.	Оптимизация загрузки металлорежущих станков.....	330
7.9.	Оптимизация затрат на перевозку заготовок.....	333
7.10.	Оптимизация режимов механической обработки.....	335
7.11.	Научный подход к выбору оптимальных способов обработки.....	336
7.12.	Оптимизация условий применения автоматизированного оборудования.....	338
Глава 8.	Производительность и экономичность технологических процессов.....	342
8.1.	Эффективность станков с ЧПУ и гибких производственных систем (ГПС).....	342
8.2.	Структура нормы времени.....	346
8.3.	Особенности нормирования многоинструментальной обработки.....	351
8.4.	Технологическая себестоимость.....	352
8.5.	Экономическое сравнение вариантов технологических процессов.....	354
Глава 9.	Технологичность конструкции машины.....	360
9.1.	Общие понятия о технологичности конструкции изделия.....	360
9.2.	Требования к конструкциям деталей и заготовок.....	361
9.3.	Расчет показателей технологичности изделий....	364
Глава 10.	Методы обработки поверхностей деталей машин.	369
10.1.	Обработка наружных поверхностей тел вращения.....	369
10.2.	Методы обработки отверстий.....	377

10.2.1.	Виды отверстий и методы их обработки.....	377
10.2.2.	Обработка отверстий лезвийным инструментом.....	378
10.2.3.	Обработка отверстий абразивными инструментами.....	382
10.2.4.	Шлифование отверстий с планетарным движением шпинделя.....	384
10.2.5.	Хонингование отверстий.....	385
10.2.6.	Притирка (доводка) отверстий.....	386
10.3.	Методы обработки резьб.....	386
10.3.1.	Нарезание резьб резцами и гребенками.....	387
10.3.2.	Нарезание резьбы метчиками, плашками и резьбонарезными головками.....	389
10.3.3.	Фрезерование резьбы.....	390
10.3.4.	Накатывание резьбы.....	391
10.3.5.	Шлифование резьбы.....	394
10.4.	Методы обработки зубьев зубчатых колес.....	394
10.4.1.	Обработка цилиндрических зубчатых колес.....	395
10.4.2.	Обработка червячных зубчатых колес.....	401
10.4.3.	Обработка конических зубчатых колес.....	402
10.4.4.	Обработка червяков.....	403
10.4.5.	Методы чистовой обработки зубчатых колес.....	405
10.4.6.	Влияние степени точности зубчатых колес на трудоемкость их изготовления.....	413
10.5.	Физико-химические методы обработки поверхностей.....	413
10.5.1.	Электроискровая обработка.....	414
10.5.2.	Анодно-механическая обработка.....	415
10.5.3.	Электрохимическая размерная обработка.....	416
10.5.4.	Электроабразивная обработка.....	419
10.5.5.	Ультразвуковая обработка.....	421
Глава 11.	Типовые технологические процессы.....	423
11.1.	Технология изготовления корпусных деталей....	423
11.1.1.	Обработка заготовок деталей типа станин.....	430
11.1.2.	Влияние конструктивно-технологической модификации элементов станков на точность обработки деталей.....	434

11.1.3.	Коррекция систематических погрешностей.....	437
11.1.4.	Анализ проблем повышения точности обработки.....	440
11.2.	Технология изготовления шпинделей станков...	441
11.3.	Технология изготовления ходовых винтов.....	446
11.4.	Технология изготовления цилиндрических зубчатых колес.....	449
11.4.1.	Служебное назначение зубчатых колес.....	449
11.4.2.	Материал и термическая обработка.....	451
11.4.3.	Выбор баз и технологический маршрут обработки зубчатого колеса.....	453
11.5.	Технология изготовления деталей из пластмасс и металлокерамики.....	458
11.5.1.	Характеристика пластмасс и методы изготовления пластмассовых деталей.....	458
11.5.2.	Характеристика металлокерамических материалов и технология изготовления изделий.....	463
Литература.....		468
Приложения.....		475

Учебное издание

Александр Васильевич Якимов
Федор Васильевич Новиков
Алексей Александрович Якимов
Григорий Васильевич Новиков
Николай Иванович Решетнев

Теоретические основы технологии машиностроения

Учебник

Редактор Т.И.Лучнева
Корректор Н.В. Мищенко

Подписано к печати 10.07.2001. Формат 60x84/16. Бумага белая.
Печать офсетная. 28,56 усл. печ. л. 30,69 уч. – изд. л.
Тираж 500 экз. Заказ №785.Цена договорная.

Одесский национальный политехнический университет
65044, Одесса, проспект Шевченко, 1.