МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

В.Ф. Скворцов

ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИИ МАШИНОСТРОЕНИЯ

*Допущено Учебно-методическим объединением вузов
по университетскому политехническому образованию
в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений,
обучающихся по направлению подготовки бакалавров
150700 «Машиностроение»*

Издательство
Томского политехнического университета
2013

УДК 621.002(075.8)
ББК 34.5я73
С42

Скворцов В.Ф.

С42 Основы технологии машиностроения: учебное пособие / В.Ф. Скворцов; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2013. – 310 с.

ISBN 978-5-4387-0235-1

В пособии изложены теоретические основы технологии машиностроения, рассмотрено проектирование технологических процессов изготовления деталей и сборки машин, приведены контрольные вопросы.

Предназначено для студентов, обучающихся по направлению подготовки бакалавров 150700 «Машиностроение».

УДК 621.002(075.8)
ББК 34.5я73

Рецензенты

Доктор технических наук, профессор
заведующий кафедрой технологии машиностроения
Омского государственного технического университета

А.П. Моргунов

Доктор технических наук, профессор
заведующий кафедрой технологии машиностроения
Тюменского государственного нефтегазового университета

Ю.И. Некрасов

Кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизации
и роботизации в машиностроении ТПУ

М.Г. Гольдшмидт

ISBN 978-5-4387-0235-1

© ФГБОУ ВПО НИ ТПУ, 2013
© Скворцов В.Ф., 2013
© Оформление. Издательство Томского политехнического университета, 2013

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ 7

1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА 9

1.1. Изделие и его жизненный цикл 9

1.2. Качество изделий 12

1.3. Производственный и технологический процессы 15

1.4. Норма времени 19

1.5. Типы производств в машиностроении 24

1.6. Производительность труда 28

1.7. Себестоимость изделия 29

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ 30

2. ПОЛОЖЕНИЯ И МЕТОДЫ ТЕОРИИ ВЕРОЯТНОСТЕЙ И МАТЕМАТИЧЕСКОЙ СТАТИСТИКИ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ В ТЕХНОЛОГИИ МАШИНОСТРОЕНИЯ 31

2.1. Случайные величины и законы их распределения 31

2.2. Анализ точности обработки заготовок по кривым распределения 40

2.3. Корреляционный анализ точности обработки заготовок 44

2.4. Точечные и точностные диаграммы 47

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ 48

3. ОСНОВЫ БАЗИРОВАНИЯ И РАЗМЕРНЫЕ ЦЕПИ 50

3.1. Основы базирования 50

3.1.1. Общие понятия о базах и базировании 50

3.1.2. Классификация баз 54

3.2. Основы теории размерных цепей 58

3.2.1. Основные понятия и определения 58

3.2.2. Основные уравнения 63

3.2.3. Методы достижения точности замыкающих звеньев размерных цепей 69

3.2.3.1. Метод полной взаимозаменяемости 70

3.2.3.2. Метод неполной взаимозаменяемости 72

3.2.3.3. Метод групповой взаимозаменяемости 74

3.2.3.4. Метод пригонки 79

3.2.3.5. Метод регулирования 80

3.2.4. Размерный анализ спроектированных технологических процессов изготовления деталей 82

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ 92

4. ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛА И ТОЧНОСТИ ДЕТАЛИ 93
4.1. Технологическое обеспечение свойств материала детали 93
4.1.1. Общие представления о формировании свойств материала детали при ее изготовлении 93
4.1.2. Качество поверхностного слоя и его влияние на эксплуатационные свойства деталей 99
4.1.2.1. Основные показатели качества поверхностного слоя 99
4.1.2.2. Измерение параметров качества поверхностного слоя 103
4.1.2.3. Влияние качества поверхностного слоя на эксплуатационные свойства деталей 105
4.1.3. Технологическое обеспечение качества поверхностного слоя деталей 108
4.1.3.1. Обеспечение качества поверхностного слоя при обработке резанием 108
4.1.3.2. Обеспечение качества поверхностного слоя поверхностным пластическим деформированием (ППД) 119
4.1.3.3. Обеспечение качества поверхностного слоя электрохимической обработкой и вакуумным отжигом 125
4.2. Технологическое обеспечение точности детали 127
4.2.1. Причины образования погрешностей обработки и обеспечение точности на технологическом переходе 127
4.2.1.1. Геометрические погрешности станка 128
4.2.1.2. Упругие деформации технологической системы от сил резания 132
4.2.1.3. Износ режущего инструмента 140
4.2.1.4. Температурные деформации технологической системы 144
4.2.1.5. Деформации заготовок от остаточных напряжений 149
4.2.1.6. Погрешности изготовления мерного режущего инструмента и теоретической схемы обработки 154
4.2.1.7. Погрешность установки заготовок 156
4.2.1.8. Погрешность размерной настройки технологической системы 165
4.2.1.9. Определение суммарной погрешности обработки на технологическом переходе 172
4.2.2. Об обеспечении точности при выполнении технологического процесса изготовления детали 175
4.2.3. Технологическая наследственность при изготовлении детали 176
КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ 179

5. ПОВЫШЕНИЕ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ 181
5.1. Технологические пути повышения производительности обработки заготовок 181
5.1.1. Сокращение штучного времени 181
5.1.2. Сокращение подготовительно-заключительного времени. Групповая обработка 186
5.2. Снижение себестоимости изготовления деталей 190
5.2.1. Многостаночное обслуживание 190
5.2.2. Сокращение расходов на материалы 192
5.2.3. Снижение затрат на технологическую подготовку производства деталей. Типизация технологических процессов 193
КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ 195
6. ОСНОВЫ РАЗРАБОТКИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛИ 196
6.1. Общие положения. Принципы и последовательность разработки технологического процесса 196
6.2. Анализ технических требований чертежа детали и выявление технологических задач при ее изготовлении 199
6.3. Определение типа производства 201
6.4. Технологический контроль чертежа детали 202
6.5. Выбор исходной заготовки 207
6.6. Выбор технологических баз 212
6.6.1. Принципы выбора технологических баз 212
6.6.2. Выбор технологических баз на первой операции 217
6.6.3. Выбор технологических баз на большинстве операций 223
6.7. Выбор маршрутов обработки отдельных поверхностей детали 223
6.8. Разработка маршрутного технологического процесса изготовления детали. Выбор средств технологического оснащения и формирование операций 229
6.9. Размерный анализ разрабатываемого технологического процесса 233
6.9.1. Определение допусков на технологические размеры 233
6.9.2. Определение минимальных припусков на обработку 239
6.9.3. Расчет технологических размеров 246
6.9.3.1. Задачи расчета технологических размеров 246
6.9.3.2. Методика расчета технологических размеров 250
6.10. Определение режимов резания и норм времени 265
6.11. Определение технико-экономических показателей технологического процесса 267
КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ 269

7. ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИИ СБОРКИ ИЗДЕЛИЙ 270
7.1. Общие положения. Классификация соединений составных частей изделия и видов сборки 270
7.2. Организационные формы сборки 272
7.3. Сборка типовых соединений 275
7.3.1. Сборка резьбовых соединений 275
7.3.2. Сборка прессовых соединений 280
7.3.3. Сборка клепаных и развальцованных соединений 288
7.4. Образование погрешностей изделия при сборке 292
7.5. Контроль качества сборки. Испытание собранных изделий 295
7.6. Основы разработки технологического процесса сборки изделия 298
7.6.1. Исходные данные и последовательность разработки технологического процесса сборки изделия 298
7.6.2. Технологический контроль сборочных чертежей 299
7.6.3. Разработка последовательности сборки изделия. Проектирование сборочных операций 302
КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ 306
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ 310

ВВЕДЕНИЕ

Машиностроение является важнейшей отраслью экономики. Его продукция – машины различного назначения – поставляется всем отраслям промышленности, сельского хозяйства, транспорта, определяя уровень их развития. Исключительно важная роль принадлежит машиностроению в обеспечении обороноспособности государства.

Процесс создания машины делится на два этапа. Первый этап состоит в разработке конструкции машины с оформлением соответствующих чертежей. Второй этап заключается в разработке и реализации производственных процессов изготовления деталей и сборки машины, что составляет основную задачу технологии машиностроения. Этапы создания машины тесно взаимосвязаны. Действительно, невозможно разработать хорошую конструкцию машины без учета технологии ее производства. Принятые технологии изготовления деталей и сборки машины определяют ее качество и затраты на производство. Развитие технологии позволяет применять новые конструкторские решения, обеспечивающие повышение качества машины и снижение этих затрат.

Современное представление о технологии машиностроения сформировалось на основе исследований и разработок многих поколений отечественных и зарубежных ученых и инженеров, способствовавших ее становлению как отрасли технической науки, которая занимается изучением закономерностей, действующих при изготовлении машин, с целью использования этих закономерностей для обеспечения требуемого качества машин и наименьшей их себестоимости.

Большой вклад в становление и развитие технологии машиностроения внесли отечественные ученые Б.С. Балакшин, В.М. Кован, И.М. Колесов, В.С. Корсаков, А.А. Маталин, С.П. Митрофанов, А.П. Соколовский и многие другие.

Предлагаемое учебное пособие по дисциплине «Основы технологии машиностроения» предназначено для студентов, обучающихся по направлению подготовки бакалавров 150700 «Машиностроение». Учебное пособие охватывает все основные разделы этой дисциплины и отражает опыт ее преподавания в Томском политехническом университете. В отличие от изданных в последние годы учебников и учебных пособий по указанной дисциплине [2, 6, 7, 11, 15, 16] в предлагаемом учебном пособии должное внимание уделено размерному анализу технологических процессов изготовления деталей.

Пособие состоит из семи разделов.

В первом даны основные понятия машиностроительного производства.

Во втором изложены положения теории вероятностей и математической статистики, знание которых необходимо для усвоения последующих разделов пособия. Здесь же описаны статистические методы анализа точности изделий.

В третьем рассмотрены основы базирования и теория размерных цепей. Изложены методы обеспечения точности замыкающих звеньев размерных цепей и методика размерного анализа разработанных технологических процессов изготовления деталей.

Четвертый посвящен технологическому обеспечению свойств материала и точности деталей. Значительное внимание уделено формированию параметров качества поверхностного слоя деталей. Рассмотрены основные причины образования погрешностей обработки заготовок, методы их расчетной оценки и пути снижения. Дано представление о технологической наследственности при изготовлении деталей.

В пятом показаны пути повышения производительности обработки заготовок и снижения себестоимости деталей.

В шестом изложены основы разработки технологических процессов изготовления деталей. При этом большое внимание уделено размерному анализу проектируемых технологических процессов.

В седьмом рассмотрена сборка типовых соединений деталей, изложена последовательность и содержание основных этапов разработки технологических процессов сборки машин.

Автор выражает глубокую благодарность научному редактору и рецензентам за полезные замечания, а также учебному мастеру кафедры технологии автоматизированного машиностроительного производства Томского политехнического университета Л.А. Оголь за помощь при подготовке рукописи учебного пособия к изданию.

1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

1.1. Изделие и его жизненный цикл

Изделием называется продукт конечной стадии машиностроительного производства. Им может быть машина, сборочная единица (узел), заготовка или деталь.

Машина – это механизм или сочетание механизмов, выполняющих движения для преобразования энергии, материалов или производства работ. В настоящее время практически все машины являются мехатронными системами. Механическая часть этих систем производится на машиностроительных предприятиях, электронная – на предприятиях электронной промышленности.

Заготовкой в машиностроительном производстве называется изделие, используемое для изготовления детали. Заготовку, поступающую на первую операцию механической обработки, называют *исходной заготовкой*.

Деталь – это изделие, изготовленное из однородного по наименованию и марке материала, без применения сборочных операций. Деталями, например, являются: валик из одного куска металла; литой корпус; пластина из биметаллического листа; маховичок из пластмассы (без арматуры). Деталями являются эти же изделия с покрытиями (защитными или декоративными), а также изделия, изготовленные с применением местной сварки, пайки и склейки, например трубка, спаянная или сваренная из одного куска листового материала.

Сборочная единица – это изделие, составные части которого подлежат соединению на предприятии-изготовителе сборочными операциями. Сборочная единица может состоять из отдельных деталей или из сборочных единиц более высоких порядков и деталей. Сборочная единица первого порядка входит непосредственно в машину. Она может состоять из отдельных деталей или из сборочных единиц второго порядка и деталей. Сборочная единица второго порядка может включать сборочные единицы третьего порядка и детали и т. д. Сборочная единица наивысшего порядка состоит только из отдельных деталей.

Таким образом, состав изделия (машины) может быть представлен в виде схемы, приведенной на рис. 1.1.

Кроме названных видов изделий, в машиностроении различают комплексы и комплекты.

Рис. 1.1. Состав машиностроительного изделия

Комплекс – это два и более специфицированных изделия, не соединенных на предприятии-изготовителе сборочными операциями, но предназначенных для выполнения взаимосвязанных эксплуатационных функций (например, автоматическая линия из металлорежущих станков, бурильная установка, корабль и др.).

Комплект – это два и более изделия, не соединенных на предприятии-изготовителе сборочными операциями и представляющих набор изделий, имеющих общее эксплуатационное назначение вспомогательного характера (например, комплект запасных частей, комплект инструментов и т. п.).

Изделия, в зависимости от их назначения, делят на изделия основного и вспомогательного производства. Первые предназначены для реализации, вторые – для собственных нужд предприятия.

Совокупность взаимосвязанных процессов последовательного изменения состояния изделия от формирования исходных требований к нему до окончания его эксплуатации принято называть *жизненным циклом* изделия.

Жизненный цикл машиностроительного изделия схематично показан на рис. 1.2.

Вначале предприятие изучает рынок спроса на изделие и его потребительские свойства, далее выполняет научно-исследовательские, опытно-конструкторские и технологические работы и проектирование конкурентоспособного изделия. Почти в это же время осуществляется конструкторская и технологическая подготовка производства. Конструкторская подготовка производства включает в себя разработку конструкции изделия и создание соответствующей технической документации (чертежей, спецификаций и т. д.). Технологическая подготовка производства состоит в создании технологических процессов сборки изделия и изго-

товления его деталей, разработке конструкций и изготовлении режущих и измерительных инструментов, приспособлений и другой технологической оснастки с оформлением соответствующей документации. Параллельно с конструкторско-технологической подготовкой производства изготавливается опытный образец изделия, проводятся его испытания, а также осуществляются научно-исследовательские работы с целью совершенствования конструкции опытного образца и технологии его производства. После завершения конструкторско-технологической подготовки производства начинается серийный выпуск изделия.

Рис. 1.2. Жизненный цикл машиностроительного изделия [12]

При эксплуатации изделия осуществляется его техническое обслуживание и текущий ремонт, затем капитальный ремонт и частичная утилизация. При достижении периода физического или морального старения изделие утилизируют.

1.2. Качество изделий

Под *качеством изделия* понимают совокупность свойств изделия, обуславливающих его пригодность удовлетворять определенные потребности в соответствии со своим назначением.

Качество машиностроительных изделий оценивают системой показателей, которые обычно разделяют:

- на показатели технического уровня;
- эксплуатационные показатели;
- производственно-технологические показатели (или показатели технологичности конструкции).

Показателями технического уровня изделий являются: *мощность, производительность, КПД, точность, степень механизации и автоматизации, экономичность, экологичность* и т. д.

К эксплуатационным показателям качества изделий относят: надежность; *эргономическую характеристику*, т. е. степень учета комплекса гигиенических, физиологических и других потребностей человека в системе человек – изделие (машина) – среда; *эстетическую оценку*, т. е. совершенство художественной композиции, внешнее оформление изделия и др.

Важнейшим эксплуатационным показателем качества изделий является надежность. Это комплексный показатель, который включает в себя безотказность, долговечность, ремонтопригодность и сохраняемость.

Надежность – свойство изделия сохранять в течение определенного времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции при заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания и транспортирования.

Безотказность – свойство изделия непрерывно сохранять работоспособное состояние в течение времени. Показателем безотказности может быть, например, средняя наработка на отказ.

Долговечность – свойство изделия сохранять работоспособное состояние до наступления предельного состояния при установленной системе технического обслуживания и ремонта. Показателем долговечности может являться, например, средний срок службы.

Ремонтопригодность – свойство изделия, заключающееся в его приспособленности к предупреждению, отысканию и устранению в нем отказов и неисправностей путем проведения технического обслуживания и ремонта.

Сохраняемость – свойство изделия сохранять работоспособное состояние в течение и после хранения и (или) транспортирования.

Производственно-технологические показатели качества изделий (показатели технологичности) отражают технологическую рациональность конструкции изделия.

Под *технологичностью* понимают совокупность свойств конструкции изделия, определяющих ее приспособленность к достижению оптимальных затрат при производстве, техническом обслуживании и ремонте для заданных показателей качества, объема выпуска и условий выполнения работ. Технологичность конструкций изделий оценивают качественно («хорошо» – «плохо», «рационально» – «нерационально», «технологично» – «нетехнологично») и количественно.

Например, корпус подшипника может иметь различную конструкцию (рис. 1.3, *а, б*). У конструкции (рис. 1.3, *б*) сокращается длина обрабатываемой поверхности и затраты на ее механическую обработку, поэтому именно эта конструкция является рациональной. Конструктивный элемент крышки может иметь различное исполнение (рис. 1.3, *в, г*). При сверлении наклонного отверстия возникает неуравновешенная радиальная сила, которая может вызвать поломку сверла. Поэтому рациональным является конструктивное исполнение элемента крышки, показанное на рис. 1.3, *г*.

Основными количественными показателями технологичности конструкции изделия являются трудоемкость, материалоемкость и себестоимость.

Рис. 1.3. Примеры нерациональных и рациональных конструкций элементов деталей

Трудоемкость изготовления изделия представляет собой затраты труда на выполнение технологических процессов его изготовления.

Материалоемкость изделия – это расход материала, необходимого на его производство и эксплуатацию.

Себестоимость изделия включает в себя затраты предприятия на изготовление единицы продукции, выраженные в денежной форме.

Отработка изделий на технологичность производится при конструировании, т. е. выполняется конструкторами. Технологи, разрабатывая технологические процессы изготовления изделий, осуществляют *технологический контроль* конструкторской документации на соответствие требованиям технологичности.

Подробнее вопросы обеспечения технологичности конструкций изделий рассмотрены в разд. 6 и 7.

Важнейшим показателем качества изделий является их геометрическая точность. Точность детали характеризуется допусками размеров, формы и расположения поверхностей. Точность изделий характеризуется точностью относительного движения или положения исполнительных поверхностей, которая зависит от точности деталей и сборки этих изделий. Так, например, одними из характеристик геометрической точности токарного станка являются допуски параллельности оси шпинделя направлению движения суппортов в вертикальной и горизонтальной плоскостях.

Точность изделий машиностроения неуклонно возрастает. За последние сто лет она выросла примерно в 50 раз; допуски размеров отдельных деталей в настоящее время составляют 1 мкм и менее. Это объясняется как увеличением быстроходности машин, так и стремлением повысить их надежность. С повышением быстроходности машин неизбежно возрастают динамические нагрузки на детали и снижается их долговечность. Уменьшить эти нагрузки часто можно только путем повышения точности деталей и сборки машины. При неизменных условиях эксплуатации повышение точности изделий увеличивает их надежность. Например, повышение точности деталей шарикового подшипника и снижение радиального зазора с 20 до 10 мкм увеличивает срок службы подшипника с 740 до 1200 ч.

Точность изделий имеет большое значение и для самого процесса их производства. Повышение точности деталей увеличивает уровень взаимозаменяемости и устраняет пригонку при сборке машин. Повышение точности исходных заготовок снижает объем механической обработки и удешевляет ее.

В машиностроении решаются две основные точностные задачи:

- устанавливается необходимая точность машины и ее деталей;
- обеспечивается достижение этой точности при производстве машин.

Первая задача решается конструкторами, вторая – технологами.

Установление необходимой точности является ответственным этапом в работе конструкторов. Оно производится на основе анализа условий работы машины с учетом динамических явлений, опыта эксплуатации машин аналогичного типа, геометрического анализа и расчета размерных цепей, а также на основе специально поставленных экспериментов и испытаний опытных образцов изделий.

Технологи для достижения установленной точности разрабатывают соответствующие технологические процессы изготовления деталей и сборки машин, определяют необходимые методы и средства технического контроля точности, анализируют фактическую точность изготовления изделий, выявляют при необходимости причины образования недопустимых погрешностей их изготовления и изыскивают пути повышения точности изделий.

1.3. Производственный и технологический процессы

Производственный процесс – это совокупность всех действий людей и орудий труда, необходимых на данном предприятии для изготовления и ремонта изделий. Он охватывает: подготовку средств производства и организацию обслуживания рабочих мест; получение и хранение материалов и полуфабрикатов; все стадии изготовления деталей машин; сборку изделий; транспортирование материалов, заготовок, деталей и готовых изделий; технический контроль на всех стадиях производства; упаковку готовых изделий и другие действия, связанные с изготовлением выпускаемых изделий. Важнейшим элементом производственного процесса является техническая подготовка производства, включающая в себя его конструкторскую и технологическую подготовку, а также календарное планирование производства.

Технологическим процессом называют часть производственного процесса, содержащую целенаправленные действия по изменению и (или) определению состояния предмета труда. К предметам труда относятся различные виды изделий.

Технологические процессы в зависимости от содержания делятся на процессы механической обработки, сборки, литья, термической обработки, нанесения покрытий и т. д.

Для реализации любого технологического процесса необходима совокупность орудий труда, называемых *средствами технологического оснащения (СТО)*.

СТО делятся на технологическое оборудование и технологическую оснастку. *Технологическим оборудованием* называют СТО, в которых для

выполнения определенной части технологического процесса размещают материалы и заготовки, а также средства воздействия на них. Примерами технологического оборудования являются металлообрабатывающие станки, прессы, литейные машины, печи, гальванические ванны и т. д.

СТО, дополняющие технологическое оборудование для выполнения определенной части технологического процесса, называют *технологической оснасткой* (режущий инструмент, штампы, приспособления для установки заготовок, измерительный инструмент и т. д.).

Технологические процессы выполняют на рабочих местах. *Рабочим местом* называют элементарную единицу структуры предприятия, где размещены различные исполнители работ, обслуживаемое технологическое оборудование или часть конвейера, а также технологическая оснастка и (на ограниченное время) предметы производства.

Технологические процессы делят на операции. *Технологической операцией* называют законченную часть технологического процесса, выполняемую на одном рабочем месте. Операция охватывает все действия оборудования и рабочего (рабочих) над одним или несколькими совместно обрабатываемыми или собираемыми объектами производства. При обработке на станках операция включает все действия рабочего, управляющего станком, а также автоматические движения станка, осуществляемые при обработке заготовки до момента снятия ее со станка и перехода к обработке другой заготовки.

Для операций характерна непрерывность работы над объектами производства. Предположим, что производится токарная обработка партии ступенчатых валиков из круглого проката, нарезанного на заготовки длиной несколько больше длины валиков. Если каждый валик сначала обтачивают с одной стороны, затем переустанавливают и обтачивают с другой стороны, то токарная обработка валиков составит одну операцию. Если все валики партии сначала обтачивают с одной стороны, а затем – с другой, то токарная обработка валиков составит две операции.

Содержание операций может изменяться в широких пределах – от работы, выполняемой на отдельном станке, до работы, выполняемой на автоматической линии.

Наименование операциям дается по виду технологического оборудования, на котором они выполняются. Например, токарная, фрезерная, автоматная, прессовая и т. д.

Операции нумеруют числами ряда арифметической прогрессии (5, 10, 15, …). Допускается к числам добавлять слева ноли.

Операция является основной частью технологического процесса в организационно-экономическом отношении. На операции устанавливают нормы времени, по ним определяют трудоемкость технологического

процесса, необходимое количество производственных рабочих и материально-техническое обеспечение производства (оборудование, приспособления, инструменты и т. д.).

Операции делятся на установы, позиции, переходы, рабочие ходы.

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

Например, если на токарной операции ступенчатый валик закрепляется и обтачивается сначала с одной стороны, а затем переворачивается и обтачивается с другой стороны, то эта операция будет состоять из двух установов.

Установы обозначают прописными буквами русского алфавита (А, Б, В, …).

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

На рис. 1.4 показана схема сверлильной операции, выполняемой на двухшпиндельном сверлильном станке с поворотным столом. На нем для установки заготовок размещено три трехкулачковых патрона. В первой позиции (*I*) заготовка устанавливается в патрон, затем за счет поворотов стола она вместе с патроном последовательно перемещается на вторую (*II*) и третью (*III*) позиции, на которых соответственно сверлится и рассверливается отверстие. После чего заготовка вновь попадает на первую позицию, на которой она снимается со станка и заменяется следующей заготовкой.

Рис. 1.4. Схема обработки заготовок на двухшпиндельном сверлильном станке

Таким образом, неизменно закрепленная заготовка последовательно занимает три различных положения относительно инструмента, т. е. операция содержит три позиции. Для обозначения позиций применяют римские цифры (*I, II, III*, …).

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

Технологический переход характеризуется постоянством применяемого инструмента, поверхностей, образуемых обработкой или соединяемых при сборке, а также постоянством технологического режима.

Токарная операция, эскиз которой приведен на рис. 1.5, *а*, содержит два перехода (обтачивание поверхности *1* – первый переход, обтачивание поверхности *2* – второй переход). Переход, при котором обрабатывается одна поверхность одним инструментом, называют *простым*, или *элементарным*. На рис. 1.5, *б* показан эскиз токарной операции, выполняемой за один переход, когда одновременно обтачиваются две поверхности (*1* и *2*) двумя инструментами. Такой переход, при котором в работе одновременно участвуют несколько инструментов, называют *сложным переходом* (рис. 1.5, *б*).

При обработке заготовок на станках с ЧПУ несколько поверхностей могут последовательно обрабатываться одним инструментом (например, резцом) при его движении по траектории, задаваемой управляющей программой. В этом случае говорят, что выполняется *инструментальный переход*.

Наименование переходов указывается в повелительном наклонении (обточить поверхность …, нарезать резьбу …, протянуть паз …). Переходы нумеруются числами натурального ряда (1, 2, 3…).

Рис. 1.5. Эскизы токарных операций:
а – простые переходы; б – сложные переходы

Состав, содержание и последовательность выполнения технологических переходов определяют структуру технологической операции.

Технологическая операция может быть построена на основе *концентрации* или *дифференциации* технологических переходов. При концентрации переходов операция включает максимально возможное их число. В предельном случае технологический процесс изготовления детали может состоять лишь из одной технологической операции. При дифференциации переходов стремятся к минимизации их числа в технологической операции. В предельном случае в состав каждой технологической операции технологического процесса изготовления детали может входить лишь один технологический переход.

Наряду с технологическими выделяют вспомогательные переходы.

Вспомогательный переход – это законченная часть технологической операции, состоящая из действий человека и (или) оборудования, которые не сопровождаются изменением свойств предметов труда, но необходимы для выполнения технологического перехода.

Примерами вспомогательных переходов являются установка заготовки, смена инструмента, например, путем поворота резцедержателя токарного станка и т. д.

Технологические переходы разделяют на рабочие ходы.

Рабочий ход – это законченная часть технологического перехода, состоящая из однократного перемещения инструмента относительно заготовки, сопровождаемого изменением формы, размеров, качества поверхностного слоя и свойств заготовки.

Прием – законченная совокупность действий человека при выполнении перехода или его части, объединенных одним целевым назначением. Так, для установки заготовки в приспособление необходимо последовательно выполнить следующие приемы: взять заготовку из тары, установить в приспособление и закрепить ее в нем.

1.4. Норма времени

Как уже отмечалось, технологическая операция – основной расчетный элемент технологического процесса. Время и затраты на выполнение операции являются важнейшими критериями ее эффективности при заданной программе выпуска изделий.

Программой выпуска изделий называют установленный для данного предприятия перечень изготавливаемых или ремонтируемых изделий с указанием объема выпуска за планируемый период времени. Под *объемом выпуска* понимают количество изделий определенных наименований, типоразмеров и исполнений, изготавливаемых или ремонтируемых предприятием в течение планируемого периода времени (обычно – в течение года). Объем выпуска в значительной степени определяет построение технологических процессов.

При заданном объеме выпуска изделия в большинстве случаев изготавливают партиями.

Производственную партию образуют изделия, запускаемые в обработку в течение определенного интервала времени. Производственную партию или ее часть, поступающую на рабочее место для выполнения технологической операции, называют *операционной партией*.

Выполнение любой технологической операции требует затрат времени работы оборудования и рабочих. Интервал календарного времени от начала до конца периодически повторяющейся технологической операции независимо от числа одновременно изготавливаемых или ремонтируемых изделий называют *циклом технологической операции*.

Интервал времени, равный отношению цикла технологической операции к числу одновременно изготавливаемых или ремонтируемых изделий или равный календарному времени сборочной операции, называют *штучным временем*.

В неавтоматизированном производстве штучное время определяется по формуле

$$t_{ш} = t_{о} + t_{в} + t_{обс} + t_{п},$$

где $t_{о}$ – основное время; $t_{в}$ – вспомогательное время; $t_{обс}$ – время обслуживания рабочего места; $t_{п}$ – время на личные потребности рабочего.

Основное время затрачивается на изменение и (или) последующее определение состояния предмета труда. Это время может быть машинным, машинно-ручным или ручным. Основное время для каждого перехода находят по формуле

$$t_{о} = \frac{Li}{S_{м}},$$

где L – расчетная длина обработки (длина перемещения инструмента, мм); i – число рабочих ходов в данном переходе; $S_{м}$ – подача инструмента, мм/мин.

При ручном подводе инструмента к заготовке

$$L = l + l_{вр} + l_{сх},$$

где l – длина обрабатываемой поверхности; $l_{вр}$, $l_{сх}$ – длина врезания и схода инструмента соответственно.

При автоматическом цикле обработки

$$L = l + l_{вр} + l_{сх} + l_{пд},$$

где $l_{пд}$ – длина подвода инструмента к заготовке для исключения удара в начале обработки.

Длину l определяют по чертежу заготовки, длину подвода и схода принимают равной 1 мм. Значение длины врезания инструмента находят из геометрических соотношений. При продольном точении (рис. 1.6, *а*) $l_{вр} = t\text{ctg}\varphi$, где t – глубина резания; φ – главный угол в плане резца. При сверлении стандартным спиральным сверлом (рис. 1.6, *б*) $l_{вр} \approx 0{,}3d_с$, где $d_с$ – диаметр сверла. При фрезеровании паза дисковой фрезой (рис. 1.6, *в*) $l_{вр} = \sqrt{t(d_ф - t)}$, где $d_ф$ – диаметр фрезы.

Рис. 1.6. Схемы определения расчетной длины перемещения инструмента при продольном точении (а), сверлении (б) и фрезеровании паза дисковой фрезой (в)

Вспомогательным временем называют часть штучного времени, затрачиваемую на выполнение приемов, необходимых для обеспечения изменения и последующего определения состояния предметов труда. Вспомогательное время затрачивается на установку, закрепление и снятие обрабатываемой заготовки или собираемой части изделия, управление механизмами оборудования, подвод и отвод режущего инструмента, измерение обрабатываемой заготовки и т. д. Вспомогательное время можно определить как сумму времени выполнения всех вспомогательных переходов, входящих в операцию. Время, затрачиваемое на выполнение *i*-го вспомогательного перехода $t_{вi}$, представляющего собой совокупность *m* приемов, составляет

$$t_{вi} = \sum_{j=1}^{j=m} t_{вj} ,$$

где $t_{вj}$ – время, затрачиваемое на выполнение *j*-го приема. Время выполнения каждого приема устанавливают по нормативам вспомогательного времени, которые учитывают конкретные условия осуществления операции.

Сумму основного и вспомогательного времени называют *оперативным временем* $t_{оп}$. Причем в $t_{оп}$ включают только часть вспомогательного времени, которая не перекрывается основным. Например, в сверлильной операции, показанной на рис. 1.4, установка, закрепление и снятие заготовок производится во время их обработки в рабочих позициях *II* и *III*, поэтому затраты времени на эти действия не следует включать в оперативное время.

Время обслуживания рабочего места – это часть штучного времени, затрачиваемая исполнителем на поддержание средств технологического оснащения в работоспособном состоянии и уход за ними и рабочим местом. Принято различать время технического $t_{т}$ и время организационного обслуживания $t_{орг}$, т. е. считать

$$t_{обс} = t_{т} + t_{орг}.$$

Время технического обслуживания затрачивается на смену затупившегося инструмента, подналадку оборудования, уборку стружки из зоны обработки. Его берут в процентах (до 6 %) от оперативного или основного времени или принимают по нормативам в зависимости от вида выполняемых работ.

Время организационного обслуживания включает в себя затраты времени на подготовку рабочего места к началу работы, его уборку и смазку станка в конце смены и другие аналогичные действия в течение смены. Это время берут в процентах от оперативного времени (0,6…8 %).

Время на личные потребности затрачивается человеком на удовлетворение личных потребностей и при утомительных работах на отдых. Это время также берут в процентах от оперативного времени (около 2,5 %).

В практических расчетах штучное время вычисляют по упрощенной формуле

$$t_{ш} = t_{оп}\left(1 + \frac{\alpha + \beta + \gamma}{100}\right),$$

где α, β, γ – процентная доля соответственно времени технического обслуживания, организационного обслуживания и времени на личные потребности от оперативного времени. Значения α, β и γ принимают по нормативам.

При использовании автоматического оборудования штучное время определяют по формуле

$$t_{ш} = t_{оп}\left(1 + \frac{\alpha}{100}\right).$$

При обработке заготовок партиями находят *подготовительно-заключительное время* $t_{пз}$, под которым понимают интервал времени, затрачиваемый на подготовку исполнителя или исполнителей и средств технологического оснащения к выполнению технологической операции и приведению этих средств в порядок после окончания смены и (или) выполнения данной операции для партии предметов труда. Подготовительно-заключительное время затрачивается рабочим на ознакомление с чертежом и технологической документацией, подготовку и наладку оборудования, инструментов и приспособлений, снятие и сдачу инструментов и приспособлений после обработки партии заготовок.

Время обработки партии заготовок на данной операции составляет

$$t_{п} = t_{пз} + t_{ш} n,$$

n – число заготовок в партии.

Определение затрат времени на выполнение отдельных технологических операций и технологического процесса в целом является одной из важнейших задач *технологического нормирования*, под которым понимают установление технически обоснованных норм расхода производственных ресурсов (рабочего времени, материалов, инструментов и т. д.).

Нормой времени называют регламентированное время выполнения некоторого объема работ в определенных производственных условиях одним или несколькими исполнителями соответствующей квалификации.

Принято различать нормы: штучного, оперативного, основного, вспомогательного и подготовительно-заключительного времени.

Если изделия изготавливаются непрерывно, то в качестве нормы времени $Н_{вр}$ на операцию используют норму штучного времени $t_{ш}$, т. е.

$$Н_{вр} = t_{ш}.$$

Если изделия изготавливают партиями, то в качестве нормы времени $Н_{вр}$ на операцию принимают сумму нормы штучного времени $t_{ш}$ и нормы подготовительно-заключительного времени $t_{пз}$, которая приходится на одно изделие партии, т. е.

$$Н_{вр} = t_{ш} + \frac{t_{пз}}{n}.$$

Величину, обратную норме времени, называют нормой выработки.

Норма выработки – это регламентированный объем работы, которая должна быть выполнена в единицу времени в определенных организационно-технических условиях одним или несколькими исполнителями соответствующей квалификации. Норма выработки может выражаться, например, числом заготовок, которые должны быть обработаны за единицу времени.

Для определения нормы времени используют три метода:

- технического расчета по нормативам;
- расчета на основе изучения затрат рабочего времени наблюдением;
- сравнения и расчета по укрупненным типовым нормам.

Норму времени устанавливают на основе анализа содержания действий рабочего и технологического оборудования при его наивыгоднейшем использовании.

При первом методе норму времени на операцию определяют расчетным путем по элементам с использованием нормативов, которые представляют собой расчетную продолжительность выполнения этих элементов. При втором методе норму времени устанавливают на основе изучения затрат рабочего времени наблюдением непосредственно в производственных условиях. Принято различать два основных способа изучения затрат рабочего времени наблюдением: *хронометраж и фотография рабочего дня*. С помощью хронометража изучают затраты времени на выполнение ручных и машинно-ручных элементов операции (например, времени, затрачиваемого на установку и закрепление заготовки) для установления их нормальной продолжительности, а также для разработки на этой основе соответствующих нормативов. Фотография рабочего дня включает в себя измерение всех затрат рабочего времени в течение смены или нескольких смен. Ее основное назначение – определить потери рабочего времени, установить время на обслуживание рабочего места и перерывы. При третьем методе норму времени определяют приближенно по укрупненным типовым нормативам, которые разрабатывают на основе сопоставления и расчета типовых операций.

1.5. Типы производств в машиностроении

В зависимости от потребностей различные изделия машиностроительного производства выпускают в различных количествах. Одни изделия на предприятии изготавливают в одном экземпляре, другие – сотнями тысяч штук.

В зависимости от номенклатуры и объема выпуска изделий различают три основных типа производства: единичное, серийное и массовое. Серийное производство делят на мелко-, средне- и крупносерийное.

Тип производства определяют по *коэффициенту закрепления операций* k_{30}, который представляет собой отношение числа всех различных операций, выполненных или подлежащих выполнению в течение месяца, к числу рабочих мест. Другими словами, этот коэффициент указывает среднее число операций, выполненных или подлежащих выполнению на одном рабочем месте в течение месяца. Коэффициент закрепления опера-

ций составляет: для массового производства – 1; для крупносерийного – от 1 до 10; для среднесерийного – от 10 до 20; для мелкосерийного – от 20 до 40; для единичного – от 40 и более.

Единичное производство характеризуется малым объемом выпуска одинаковых изделий, повторное изготовление и ремонт которых, как правило, не предусматривается. Продукция единичного производства – машины, не имеющие широкого применения (опытные образцы машин, крупные гидротурбины, уникальные металлорежущие станки, прокатные станы и т. д.).

Характерным признаком единичного производства является выполнение на рабочих местах большого числа разнообразных операций, которые могут вообще не повторяться. В связи с этим единичное производство должно быть очень гибким. В единичном производстве используют универсальное оборудование и стандартную технологическую оснастку. Оборудование в цехах располагают по его типам (участок токарных станков, участок фрезерных станков и т. д.). Технологические процессы изготовления изделий, как правило, детально не разрабатываются. Квалификация основных рабочих в единичном производстве высокая.

Серийное производство характеризуется изготовлением или ремонтом изделий периодически повторяющимися партиями. Продукцией серийного производства являются машины установившегося типа (металлорежущие и деревообрабатывающие станки, насосы, компрессоры, авиационные двигатели и т. п.), выпускаемые в значительных количествах. Этот тип производства является наиболее распространенным (75…80 % всех изделий машиностроения производится в условиях серийного производства).

Характерным признаком серийного производства является выполнение на рабочих местах относительно небольшого числа периодически повторяющихся операций. В серийном производстве используют как специальные средства технологического оснащения, так и универсальные. Оборудование в цехах располагают по ходу технологического процесса или по его типам (мелкосерийное производство). Технологические процессы в серийном производстве разрабатываются подробно. Квалификация основных рабочих в целом ниже, чем в единичном производстве, но остается высокой, например, при работе на станках с ЧПУ.

Массовое производство характеризуется большим объемом выпуска изделий, непрерывно изготавливаемых или ремонтируемых продолжительное время, в течение которого на большинстве рабочих мест выполняется одна операция. Продукцией массового производства являются из-

делия, рассчитанные на широкий круг потребителей (легковые автомобили, тракторы, электродвигатели небольшой мощности, подшипники качения и т. п.).

В массовом производстве применяют специальное высокопроизводительное оборудование и технологическую оснастку. Оборудование в цехах, как правило, располагают строго по ходу технологического процесса. Технологические процессы в массовом производстве разрабатывают самым детальным образом. Квалификация основных рабочих в целом невысокая, но требуются высококвалифицированные наладчики.

Деление производства на типы в известной мере является условным и производится по превалирующему производству. Например, на подшипниковом заводе производство подшипников является массовым. В ремонтном же цехе завода имеет место единичное производство.

В машиностроении применяют два метода работы: *поточный* и *непоточный.* Поточное производство характеризуется расположением оборудования в последовательности выполнения операций технологического процесса и определенным интервалом выпуска изделий. Интервал времени, через который периодически производится выпуск изделий или заготовок определенных наименований, типоразмеров и исполнений, называют *тактом выпуска*

$$t_{\text{д}} = 60\Phi_{\text{д}} / N ,$$

где $\Phi_{\text{д}}$ – действительный фонд времени работы оборудования в планируемом периоде (год, месяц, сутки, смена), ч; N – объем выпуска за этот же период.

Номинальный годовой фонд времени работы оборудования составляет 2070 часов при работе в одну смену, 4140 часов при работе в две смены и 6210 часов при работе в три смены. Действительный годовой фонд времени работы оборудования (учитывая потери времени на его ремонт) при работе в одну, две и три смены составляет соответственно 2030, 4015 и 5965 ч.

При поточном методе работа выполняется на поточной линии. В общем случае условием организации потока является кратность времени выполнения каждой технологической операции такту выпуска:

$$\frac{t_{\text{ш}_i}}{t_{\text{д}}} = k \ (k = 1, 2, 3...) ,$$

где $t_{\text{ш}_i}$ – штучное время i-й технологической операции.

Приведение длительности операций к указанному условию называют *синхронизацией*. Она достигается соответствующим построением технологических операций и применением в некоторых случаях станков-

дублеров, т. е. использованием на некоторых операциях, например, не одного, а двух станков. За время, равное такту выпуска, с поточной линии сходит одно изделие.

Количество изделий или заготовок определенных наименований, типоразмеров и исполнений, выпускаемых в единицу времени, называют *ритмом выпуска*. Обеспечение заданного ритма выпуска является важнейшей задачей при проектировании технологических процессов массового и крупносерийного производств.

В серийном производстве организовать непрерывный поток изготавливаемых изделий часто невозможно из-за низкой загрузки оборудования при небольших объемах выпуска. В этом случае применяют разновидность поточного метода, называемую *переменно-поточным методом*.

При переменно-поточном методе за каждым станком поточной линии закрепляют по несколько операций. В течение определенного периода времени (обычно несколько смен) на линии ведется обработка заготовок одного типоразмера. Затем линию переналаживают для обработки заготовок другого типоразмера и т. д.

Поточный метод работы позволяет:

- значительно (в десятки раз) сократить цикл производства;
- снизить межоперационные заделы и незавершенное производство;
- применить высокопроизводительное оборудование и сократить трудоемкость изготовления изделий;
- упростить управление производством.

При малых объемах выпуска изделий применяют непоточный метод работы. Его используют в условиях серийного и единичного производств. При непоточном методе работы длительность операций не синхронизируют, на рабочих местах создают заделы заготовок (сборочных единиц), необходимые для загрузки рабочих мест. При непоточном методе работы стремятся на каждом рабочем месте осуществить максимальное технологическое воздействие на предмет труда, сократить число операций в технологическом процессе, т. е. строить технологические операции на основе концентрации переходов.

1.6. Производительность труда

Под производительностью Q понимают объем W продукции, выпущенной в единицу времени t:

$$Q = W / t.$$

Принято различать производительность станка, труда рабочего, производственного процесса, труда работающих и общественного труда.

Производительность станка оценивают объемом удаленного с заготовки материала или площадью обработанной поверхности в единицу времени. Производительность станка зависит от его мощности, качества инструмента и режимов обработки.

Производительность труда рабочего измеряют количеством продукции, произведенной им за единицу рабочего времени. Например, производительность труда станочника определяют по количеству деталей в штуках, изготовленных за час или смену. Производительность труда рабочего зависит от производительности оборудования, интенсивности труда и его организации.

Производительность станка-автомата, выполняющего функции обычного станка и рабочего, измеряют в тех же единицах, что и производительность труда рабочего.

Производительность производственного процесса оценивают измеряемой в штуках или рублях продукцией, произведенной в единицу времени. Производительность производственного процесса зависит не только от производительности оборудования и производительности труда рабочих, но и от уровня организации, планирования этого процесса и управления им.

Производительность труда работающих характеризует эффективность работы всего коллектива предприятия. Она измеряется количеством продукции в рублях, выпущенной в единицу времени в расчете на одного работающего.

Производительность общественного труда оценивают путем сопоставления количества выпускаемой продукции за некоторый интервал времени с трудовыми затратами. При этом учитывают затраты прошлого труда, вложенные в создание оборудования, зданий и т. д., текущие затраты овеществленного труда (основные и вспомогательные материалы, электроэнергия, инструменты и т. п.) и текущие затраты живого труда.

Выпущенную продукцию измеряют либо в натуральных показателях (штуках, единицах массы или объема), либо в рублях. Суммарные трудовые затраты выражают либо в единицах абстрактного труда (человеко-час, человеко-день), либо в рублях.

1.7. Себестоимость изделия

Изготовление изделия требует расходов живого и овеществленного труда. Затраты на материалы, средства технологического оснащения и заработную плату, связанные с изготовлением изделия и выраженные в денежной форме, называют цеховой себестоимостью, которую далее будем называть просто себестоимостью.

Различают себестоимость машины, ее сборочных единиц и деталей. Можно оценивать себестоимость отдельных операций технологических процессов изготовления деталей и сборки машин.

Себестоимость определяется по формуле

$$\text{С} = \sum_{i=1}^{p} \text{М} + \sum_{i=1}^{m} \left[\text{О}+\text{П}+\text{И}+\left(1+\frac{a_1+a_2}{100}\right)\text{З} \right],$$

где М – расходы на материалы на единицу продукции за вычетом стоимости отходов, руб.; О – расходы на амортизацию, содержание и эксплуатацию оборудования, приходящиеся на единицу продукции, руб.; П – расходы на амортизацию, содержание и эксплуатацию приспособлений, приходящиеся на единицу продукции, руб.; И – расходы на амортизацию и содержание инструмента, приходящиеся на единицу продукции, руб.; a_1 – начисления на расходы по заработной плате на социальные нужды, %; a_2 – накладные расходы, начисляемые на расходы по заработной плате, %; p – число различных марок материалов, расходуемых на единицу продукции; m – число операций, которые проходит единица продукции при ее изготовлении; З – расходы на заработную плату основных производственных рабочих, приходящиеся на единицу продукции.

Различают плановую и фактическую себестоимости.

Плановую себестоимость подсчитывают с целью оценки возможных затрат на изготовление машины, отдельной детали или выполнение операций технологического процесса. Плановая себестоимость необходима для выбора наиболее экономичного варианта технологического процесса или его отдельной операции.

Фактическая себестоимость отражает затраты в реализованных производственном и технологическом процессах изготовления изделия.

Сопоставление плановой и фактической себестоимости позволяет судить о соответствии действительного технологического процесса запроектированному и способствует совершенствованию существующей технологии.

Таким образом, себестоимость единицы продукции является основным показателем экономической эффективности производственного и технологического процессов ее изготовления.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Назовите виды изделий в машиностроении.
2. Что такое жизненный цикл изделия?
3. Какими показателями характеризуется качество изделий?
4. Что понимают под технологичностью конструкции изделия?
5. Какими параметрами характеризуется точность детали и машины?
6. Чем объясняется непрерывное повышение точности машин?
7. Чем технологический процесс отличается от производственного?
8. Что включает в себя техническая подготовка производства?
9. Что такое операция?
10. Что такое переход?
11. Что называется средствами технологического оснащения?
12. Что такое штучное время?
13. Какая часть штучного времени называется основным временем?
14. Какая часть штучного времени называется вспомогательным временем?
15. Что такое подготовительно-заключительное время?
16. Что такое хронометраж и фотография рабочего дня?
17. Назовите основные типы производств в машиностроении и дайте их краткую характеристику.
18. Что такое такт выпуска изделий?
19. Что понимается под синхронизацией операций?
20. Чем поточное производство отличается от непоточного?
21. Какими показателями оценивается производительность труда?
22. Какие затраты входят в состав цеховой себестоимости?

2. ПОЛОЖЕНИЯ И МЕТОДЫ ТЕОРИИ ВЕРОЯТНОСТЕЙ И МАТЕМАТИЧЕСКОЙ СТАТИСТИКИ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ В ТЕХНОЛОГИИ МАШИНОСТРОЕНИЯ

При изготовлении деталей и сборке машин их качество, в частности геометрическая точность, зависит от большого числа технологических факторов. Причем эти зависимости носят вероятностный характер. В связи с этим решение задачи обеспечения качества машин требует привлечения положений теории вероятности и математической статистики.

2.1. Случайные величины и законы их распределения

Случайной называют величину, которая принимает те или иные значения с определенной вероятностью. Случайные величины могут быть дискретными и непрерывными.

Дискретными случайными величинами называются такие, которые в результате испытаний могут принимать лишь отдельные, изолированные, большей частью целочисленные значения и не могут принимать значения, промежуточные между ними. Например, количество негодных деталей в партии может быть только целым положительным числом 1, 2, 3 и т. д.

Непрерывной случайной величиной называется такая, которая в результате испытаний может принимать любые численные значения в границах определенного интервала. Например, действительные размеры деталей, обработанных на станке, являются случайными величинами непрерывного типа, так как они могут принять любое численное значение в некоторых границах.

С каждой случайной величиной можно связать определенное событие. Событие, которое может произойти или не произойти в результате данного испытания, называют случайным. Количественной оценкой возможности осуществления случайного события A служит вероятность $P(A)$.

Вероятностью события A называют отношение числа случаев m, благоприятствующих этому событию, к числу N всех возможных случаев в данном испытании:

$$P(A) = \frac{m}{N}.$$

При этом все случаи должны быть равновозможны, несовместимы и независимы.

Вероятность события определяется в предположении проведения очень большого числа испытаний, поэтому она имеет теоретический характер. Эмпирической характеристикой возможности случайного события A является частость события $m(A)$, которая представляет собой отношение частоты n_i появления события A к общему числу n проведенных испытаний:

$$m(A) = \frac{n_i}{n}.$$

Между вероятностью и частостью какого-либо события существует приближенное равенство

$$P(A) = \frac{m}{N} \approx \frac{n_i}{n},$$

которое оказывается тем точнее, чем больше число испытаний.

Для того чтобы охарактеризовать случайную величину, нужно знать ее распределение. Под *распределением случайной величины* понимают совокупность ее значений, расположенных в возрастающем порядке, и указаний либо их вероятностей в теоретическом распределении, либо частостей в эмпирическом.

Распределения дискретных случайных величин можно представить в виде табл. 2.1 и 2.2 или графика (рис. 2.1), построенного на основании табл. 2.2.

Таблица 2.1

Теоретическое распределение дискретной случайной величины

x	x_1	x_2	x_3	x_4	…	x_n	
$P(x)$	$P(x_1)$	$P(x_2)$	$P(x_3)$	$P(x_4)$	…	$P(x_n)$	$\sum_1^n P(x_i) = 1$

Таблица 2.2

Эмпирическое распределение дискретной случайной величины

x	0	1	2	3	4	5	
$\frac{n_i}{n}$	$\frac{1}{32}$	$\frac{5}{32}$	$\frac{10}{32}$	$\frac{10}{32}$	$\frac{5}{32}$	$\frac{1}{32}$	$\sum_{i=0}^{5} = 1$

В дальнейшем будем рассматривать только непрерывные случайные величины.

Рис. 2.1. Распределение дискретной случайной величины

Для теоретического описания распределения непрерывных величин обычно используют *дифференциальную функцию распределения* $\varphi(x)$, которую называют также *плотностью вероятности*. Дифференциальную функцию распределения можно представить в виде кривой, имеющей ту или иную форму (рис. 2.2). Вероятность того, что случайная величина x при испытаниях примет значение от a до b, равна определенному интегралу в пределах от a до b от дифференциальной функции распределения, т. е.

$$P(a \le x < b) = \int_a^b \varphi(x)dx.$$

Рис. 2.2. Кривая дифференциальной функции распределения непрерывной случайной величины

Таблица 2.3

Эмпирическое распределение непрерывной случайной величины

Интервалы значений x	Частота n_i	Частость n_i / n
20–20,05	2	0,02
20,05–20,10	10	0,10
20,10–20,15	24	0,24
20,15–20,20	30	0,30
20,20–20,25	22	0,22
20,25–20,30	10	0,10
20,30–20,35	2	0,02
	$\sum n_i = 100$	$\sum \frac{n_i}{n} = 1$

Очевидно, что если случайная величина x изменяется в пределах $\pm\infty$ (см. рис. 2.2), то вероятность того, что она при испытаниях примет любое значение в интервале $\pm\infty$, равна 1, т. е.

$$P(-\infty < x < +\infty) = \int_{-\infty}^{+\infty} \varphi(x)dx = 1.$$

Для установления эмпирического распределения непрерывных случайных величин поступают следующим образом. В совокупности значений случайной величины, полученных в результате испытаний (например, измеренных размеров деталей после обработки на станке), находят максимальное $x_{\max}$ и минимальное $x_{\min}$ значения и определяют разность

$$R = x_{\max} - x_{\min},$$

которую называют *размахом распределения*. Размах делят на ряд равных интервалов, ширина которых принимается несколько большей погрешности измерения случайной величины. Далее подсчитывают число случайных величин, попавших в каждый интервал, т. е. находят частоты, а затем – частости по интервалам. Поэтому эмпирическое распределение непрерывной случайной величины имеет вид табл. 2.3.

Это распределение может быть представлено в виде ступенчатого графика или в виде ломаной кривой (рис. 2.3). Ступенчатый график называется *гистограммой распределения*, а ломаная кривая – *полигоном распределения*, или *эмпирической кривой распределения*.

Рис. 2.3. Эмпирическое распределение непрерывной случайной величины: 1 – гистограмма; 2 – полигон

При анализе распределений случайных величин используют ряд числовых характеристик, которые определяют положение центра группирования случайной величины и ее рассеивание относительно него. В качестве характеристик центра группирования чаще всего используют математическое ожидание случайной величины и ее среднее арифметическое значение, а в качестве характеристик рассеивания – дисперсию и среднее квадратическое отклонение случайной величины.

Математическое ожидание m_x непрерывной случайной величины

$$m_x = \int_{-\infty}^{+\infty} x\varphi(x)dx .$$

Среднее арифметическое значение $\overline{X}$ непрерывной случайной величины вычисляется по формуле

$$\overline{X} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{m} x_i n_i , \qquad (2.1)$$

где x_i – среднее значение случайной величины в интервале; n_i – частота значений x_i; m – число интервалов; n – общее число наблюденных значений x.

Дисперсия D_x непрерывной случайной величины

$$D_x = \int_{-\infty}^{+\infty} \varphi(x)(x - m_x)^2 dx .$$

Дисперсия имеет размерность, представляющую собой квадрат размерности самой случайной величины. На практике это неудобно. Поэто-

му чаще пользуются не дисперсией, а корнем квадратным из нее, взятым со знаком «плюс» и называемым *средним квадратическим отклонением*

$$\sigma = +\sqrt{D_x} = \sqrt{\int_{-\infty}^{+\infty} \varphi(x)(x - m_x)^2 dx}.$$

Для эмпирических распределений среднее квадратическое отклонение определяется по формуле

$$\sigma = +\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{m} (x_i - \overline{X})^2 n_i}{n}}. \qquad (2.2)$$

В зависимости от условий испытаний распределение случайных величин может подчиняться тем или иным законам. *Законом распределения случайной величины* называется всякое соотношение, устанавливающее связь между возможными значениями случайной величины и соответствующими им вероятностями.

Наибольшее практическое значение в технологии машиностроения имеет закон нормального распределения, или закон Гаусса.

Дифференциальная функция нормального распределения (уравнение кривой этого распределения) имеет вид

$$\varphi(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-m_x)^2}{2\sigma^2}}, \qquad (2.3)$$

где x – переменная случайная величина; σ – ее среднее квадратическое отклонение; m_x – математическое ожидание величины x; e – основание натуральных логарифмов.

Кривая нормального распределения имеет холмообразную форму (рис. 2.4). Она симметрична относительно координаты $x = m_x$, т. е. равновозможны одинаковые положительные и отрицательные отклонения x от m_x. При этом меньшие отклонения более вероятны, чем большие.

Положение кривой относительно начала координат и ее форма определяются двумя параметрами m_x и σ. С изменением m_x меняется не форма кривой, а ее положение относительно начала координат (рис. 2.5). С изменением σ меняется не положение кривой, а ее форма. С уменьшением σ кривая становится более вытянутой, а ветви ее сближаются (рис. 2.6).

Рис. 2.4. Кривая нормального распределения

Рис. 2.5. Влияние m_x на положение кривой нормального распределения относительно начала координат

Вероятность $P(-\infty < x < +\infty) = 1$ представляет собой площадь под кривой нормального распределения. Вероятность значений x в любом другом интервале x_1, x_2 (рис. 2.4) будет равна (в долях единицы)

$$P(x_1 < x < x_2) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{x_1}^{x_2} e^{-\frac{(x-m_x)^2}{2\sigma^2}} dx .$$

Рис. 2.6. Влияние величины σ на форму кривой нормального распределения ($\sigma' > \sigma'' > \sigma'''$)

Произведем замену переменной x путем подстановки

$$\frac{x - m_x}{\sigma} = t.$$

Учитывая, что $x = t\sigma + m_x$ и $dx = \sigma dt$, получим

$$P(x_1 < x < x_2) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{t_1}^{t_2} e^{-\frac{t^2}{2}} dt. \qquad (2.4)$$

Новые пределы интегрирования $t_1 = \frac{x_1 - m_x}{\sigma}$ и $t_2 = \frac{x_2 - m_x}{\sigma}$ заменили пределы x_1 и x_2. Правую часть уравнения (2.4) можно представить в виде суммы двух интегралов:

$$P(x_1 < x < x_2) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}}\left(\int_{t_1}^{0} e^{-\frac{t^2}{2}}dt + \int_{0}^{t_2} e^{-\frac{t^2}{2}}dt\right) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}}\left(\int_{0}^{t_2} e^{-\frac{t^2}{2}}dt - \int_{0}^{t_1} e^{-\frac{t^2}{2}}dt\right).$$

Интеграл $\frac{1}{\sqrt{2\pi}}\int_{0}^{t} e^{-\frac{t^2}{2}}dt = \Phi(t)$ носит название нормированной функции Лапласа. Его значение для различных $t = \frac{x - m_x}{\sigma}$ табулированы и приводятся в литературе по теории вероятностей и математической статистики.

Таким образом, получим

$$P(x_1 < x < x_2) = \Phi(t_2) - \Phi(t_1) = \Phi\left(\frac{x_2 - m_x}{\sigma}\right) - \Phi\left(\frac{x_1 - m_x}{\sigma}\right), \qquad (2.5)$$

т. е. определение вероятности того, что случайная величина x находится в пределах x_1, x_2 сводится к нахождению разности между двумя значениями функции Лапласа, соответствующими t_2 и t_1. Так как эта функция нечетная, то для отрицательных t табличные значения берутся со знаком «минус».

Ветви кривой нормального распределения простираются в $\pm\infty$ и асимптотически приближаются к оси абсцисс. Однако уже при $x = m_x \pm 3\sigma$ они так близко подходят к этой оси (см. рис. 2.4), что вероятность попадания случайной величины в интервал $m_x - 3\sigma$, $m_x + 3\sigma$ составляет 0,9973 или 99,73 %. Поэтому в технике принято считать, что поле рассеивания ω случайной величины, подчиняющейся нормальному распределению, составляет 6σ.

Нормальный закон распределения имеет место при условии, что случайная величина является результатом действия большого числа различных факторов, причем среди них нет доминирующего, т. е. интенсивность влияния каждого фактора на случайную величину примерно одинакова. Этому закону подчиняются: размеры деталей, масса заготовок и деталей, твердость их материала и другие механические свойства, высота микронеровностей обработанных поверхностей, погрешности измерений и некоторые другие величины.

Если указанное условие не выполняется, то распределения непрерывных случайных величин подчиняются другим законам. Не останавливаясь на всем многообразии этих законов, коснемся только двух из них: закона равной вероятности и закона Симпсона, имеющих практическое значение в технологии машиностроения.

Распределение по закону равной вероятности имеет место тогда, когда наряду со случайными факторами действует доминирующий систематический фактор, непрерывно и равномерно изменяющий во времени математическое ожидание m_x случайной величины. Графически такое распределение представляется прямоугольником (рис. 2.7). При изменении случайной величины x от a до b

$$P(a < x < b) = \int_a^b \varphi(x)dx = 1.$$

Рис. 2.7. Распределение случайной величины по закону равной вероятности

Дифференциальная функция распределения

$$\varphi(x) = \begin{cases} \dfrac{1}{b-a} & \text{при } a \le x \le b; \\ 0 & \text{при } x < a; x > b. \end{cases}$$

Математическое ожидание, дисперсия и среднее квадратическое отклонение соответственно равны:

$$m_x = \frac{b+a}{2}; \qquad D_x = \frac{(b+a)^2}{12}; \qquad \sigma = \frac{b-a}{2\sqrt{3}}.$$

К распределению Симпсона приводит сложение двух случайных величин, подчиненных закону равной вероятности при одинаковых характеристиках распределения. Кривая распределения Симпсона имеет вид равнобедренного треугольника (рис. 2.8), из-за чего закон Симпсона часто называют законом треугольника. При выборе в качестве начала координат математического ожидания дифференциальная функция распределения имеет следующий вид:

$$\varphi(x)=\begin{cases}\dfrac{1}{a}\left(1-\dfrac{|x|}{a}\right) & \text{при} \quad -a<x<a;\\ 0 & \text{при} \quad x<-a; x>a.\end{cases}$$

Рис. 2.8. Распределение случайной величины по закону Симпсона

Характеристики распределения по закону Симпсона:

$$m_x=0; \qquad D_x=\frac{a^2}{6}; \qquad \sigma=\frac{a}{\sqrt{6}}.$$

2.2. Анализ точности обработки заготовок по кривым распределения

Указанный анализ выполняют с целью наиболее достоверной оценки фактической точности обработки заготовок на той или иной операции, определения вероятного процента брака, качества размерной настройки станка. Полученные в результате анализа данные о полях рассеивания параметров точности заготовок служат основой для создания нормативов точности обработки, которые необходимы при проектировании технологических процессов изготовления деталей.

Методику анализа точности с помощью кривых распределения рассмотрим применительно к размерам заготовок, распределение которых подчиняется нормальному закону. При других законах распределения эта методика несколько видоизменяется, но суть ее остается такой же.

Анализ точности обработки заготовок по кривым распределения выполняется следующим образом.

1. Из партии обработанных на операции заготовок (генеральной совокупности) берется выборка (группа заготовок).

Для того чтобы по данным выборки можно было уверенно судить о точности размеров заготовок в генеральной совокупности, выборка должна быть репрезентативной (представительной). Для этого она должна быть случайной и иметь необходимый объем. Выборка называется случайной, если все объекты (заготовки) генеральной совокупности имеют равную возможность попасть в выборку. С целью обеспечения случайности выборки заготовки, составляющие генеральную совокупность, обычно тщательно перемешивают в таре и выбирают их из разных мест тары. Объем выборки n обычно составляет 50–100 штук.

2. Производится измерение интересующего размера у заготовок выборки.

По результатам измерений определяется размах распределения, который при $n = 50 - 100$ штук делится на 6–8 интервалов, и подсчитывается эмпирическая частота n_i – число заготовок, попавших в каждый интервал (табл. 2.4). Находятся середины интервалов (средние значения размеров в интервале) x_i, и строятся гистограмма и эмпирическая кривая (полигон) распределения размеров (рис. 2.9). По формулам (2.1) и (2.2) подсчитываются среднее арифметическое значение размера в выборке и его среднее квадратическое отклонение. Для рассматриваемого примера (табл. 2.4 и рис. 2.9) $\bar{X}$ = 19,928 мм, σ = 0,0279 мм.

Таблица 2.4

Эмпирическое и теоретическое распределение размеров

Интервалы размеров		Середина интервала, x_i	Эмпирическая частота, n_i	t	Z_t	Теоретическая частота, n_i^t	Теоретическая частота, n_i^t (округл.)
от	до						
19,86	19,88	19,87	3	2,07	0,0468	3,40	3
19,88	19,90	19,89	16	1,35	0,1604	11,50	11
19,90	19,92	19,91	22	0,64	0,3251	23,50	23
19,92	19,94	19,93	25	0,072	0,3980	28,55	29
19,94	19,96	19,95	19	0,785	0,2940	21,45	22
19,96	19,98	19,97	13	1,50	0,1295	9,20	9
19,98	20,00	19,99	2	2,20	0,0355	2,60	3

3. Строится теоретическая кривая нормального распределения. При этом принимают, что среднее квадратическое отклонение размера в теоретическом распределении совпадает с его значением в эмпирическом, а $m_x = \bar{X}$.

Рис. 2.9. Гистограмма (1), эмпирическая кривая (2) и теоретическая кривая нормального распределения размеров (3)

Приближенно можно считать, что

$$\varphi(x) \approx \frac{n_i^T}{na} = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\bar{X})^2}{2\sigma^2}},$$

где n_i^T – теоретическая частота, a – ширина интервала. Из этого выражения получим

$$n_i^T = \frac{na}{\sigma}\frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\bar{X})^2}{2\sigma^2}}.$$

Подставляя в последнее выражение $t = \dfrac{x-\bar{X}}{\sigma}$, будем иметь

$$n_i^T = \frac{na}{\sigma}\frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{t^2}{2}}.$$

Обозначая $\dfrac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{t^2}{2}} = Z_t$, окончательно получим следующую формулу для подсчета теоретической частоты

$$n_i^T = \frac{na}{\sigma} Z_t.$$

Величина Z_t вычислена для различных t и приводится в литературе по математической статистике. Значение t для каждого интервала размеров находится по формуле

$$t = \frac{\left| x_i - \bar{X} \right|}{\sigma}.$$

Значения t, Z_t, n_i^T для рассматриваемого примера указаны в табл. 2.4. Теоретическая кривая нормального распределения размеров приведена на рис. 2.9.

4. Производится проверка соответствия эмпирического распределения теоретическому. Для этого используют ряд критериев, из которых наибольшее практическое применение имеют критерии Пирсона и Колмогорова, рассматриваемые в специальной литературе. При наличии такого соответствия дальнейший анализ точности производится по теоретической кривой нормального распределения размеров.

На основании вышеизложенного находим поле рассеивания размеров $\omega = 6\sigma = 6 \cdot 0{,}0279 = 0{,}17$ мм, которое характеризует точность операции.

Теперь предположим, что на данной операции должен выдерживаться размер $20_{-0{,}14}$ мм. Так как поле рассеивания размера превышает его допуск, то при выполнении операции неизбежен брак. Определим его вероятный процент. В соответствии с формулой (2.5) вероятный процент брака составит:

- по верхнему пределу поля допуска

$$P_{\text{б.в}} = \left[0{,}5 - \Phi(t_{\text{в}})\right] \cdot 100\ \%;$$

- по нижнему пределу поля допуска

$$P_{\text{б.н}} = \left[0{,}5 - \Phi(t_{\text{н}})\right] \cdot 100\ \%.$$

В этих выражениях

$$t_{\text{в}} = \frac{\left| x_{\text{в}} - \bar{X} \right|}{\sigma}; \qquad t_{\text{н}} = \frac{\left| x_{\text{н}} - \bar{X} \right|}{\sigma}.$$

В рассматриваемом примере: $\bar{X} = 19{,}928$ мм; $\sigma =$ 0,0279 мм; $x_{\text{в}} = 20{,}00$ мм; $x_{\text{н}} = 19{,}86$ мм. Тогда

$$t_{\text{в}} = \frac{\left| 20{,}00 - 19{,}928 \right|}{0{,}0279} = 2{,}58; \qquad t_{\text{н}} = \frac{\left| 19{,}86 - 19{,}928 \right|}{0{,}0279} = 2{,}44.$$

По таблицам нормированной функции Лапласа находим:

$$\Phi(t_{\text{в}}) = 0{,}495; \qquad \Phi(t_{\text{н}}) = 0{,}4925.$$

Таким образом, получим

$$P_{\text{б.в}} = \left[0{,}5 - 0{,}495)\right] \cdot 100\ \% = 0{,}5\ \%;$$

$$P_{\text{б.н}} = \left[0{,}5 - 0{,}4925)\right] \cdot 100\ \% = 0{,}75\ \%.$$

Следует отметить, что анализ точности по кривым распределения может быть успешно применен не только для операций обработки заготовок, но и для сборочных и контрольных операций. Вместе с тем следу-

ет иметь в виду, что такой анализ лишь фиксирует фактическую точность выполнения операций, не позволяя определить пути ее повышения.

2.3. Корреляционный анализ точности обработки заготовок

В технологии машиностроения нередко возникают задачи установления связи между погрешностями обработки заготовок, носящими случайный характер и возникающими на смежных операциях или переходах технологического процесса. К числу таких задач, например, относится задача установления связи между размерами заготовки, получаемыми при точении, и ее размерами и твердостью ее материала после штамповки. Для решения подобных частных задач применяют корреляционный анализ. Он позволяет выявить корреляционную связь между случайными величинами на входе (x) и выходе (y) операции или перехода (рис. 2.10), оценить возможности повышения точности заготовок на их выходе за счет увеличения точности на их входе.

Под *корреляционной связью* понимается такой вид связи случайных величин y с x, когда различным значениям x соответствуют определенные средние значения y, которые называют частными средними $\overline{y}_x$.

В общем виде связь $\overline{y}_x$ с x может быть выражена уравнением

$$\overline{y}_x = f(x),$$

называемым *уравнением регрессии* y на x, или *корреляционным уравнением*.

Рис. 2.10. Схема операции (перехода)

В простейшем случае наличие корреляционных связей может быть выявлено путем построения графиков зависимостей y от x (рис. 2.11). Если с изменением x частное среднее $\overline{y}_x$ изменяется (рис. 2.11, *а*), то корреляционная связь y с x существует. Если с изменением x частное среднее $\overline{y}_x$ остается практически постоянным (рис. 2.11, *б*), то корреляционная связь y с x отсутствует.

Рис. 2.11. Зависимости между случайными величинами

При корреляционном анализе точности обработки заготовок объем выборки n принимают равным 100–200 штукам. Корреляционный анализ выполняют в следующей последовательности.

Все заготовки выборки нумеруют. Производят измерение интересующих параметров заготовок, например, того или иного размера на входе (x) и выходе (y) операции (перехода). Подсчитывают средние арифметические значения $\overline{X}$, $\overline{Y}$ и средние квадратические отклонения σ_x, σ_y.

Определяют коэффициент корреляции r_{yx}:

$$r_{yx} = \frac{\sum_{i=1}^{n}(x-\overline{X})(y-\overline{Y})}{n\sigma_x\sigma_y},$$

являющийся мерой тесноты связи y с x. Значение коэффициента корреляции может изменяться от 0 до ±1. Если $r_{yx} = 0$, то между y и x не может существовать прямолинейной корреляционной связи, но криволинейная возможна. Чем ближе r_{yx} к ±1, тем теснее прямолинейная корреляционная связь y с x. Она ослабевает с приближением r_{yx} к нулю.

Принимают, что между частным средним $\overline{y}_x$ и x существует прямолинейная связь вида

$$\overline{y}_x = a + bx. \tag{2.6}$$

Коэффициент b в этом уравнении определяется по формуле

$$b = r_{yx}\frac{\sigma_y}{\sigma_x}.$$

Так как уравнение (2.6) справедливо и для $\overline{X}$, $\overline{Y}$, то коэффициент a составит:

$$a = \overline{Y} - b\overline{X}.$$

Зависимость между дисперсиями размеров заготовок на выходе σ_y^2 и входе σ_x^2 операции представляется в виде

$$\sigma_y^2 = \sigma_{yx}^2 + b^2\sigma_x^2, \qquad (2.7)$$

где $b^2\sigma_x$ – часть общей дисперсии размеров на выходе операции, вызванная их дисперсией на ее входе, а σ_{yx}^2 – часть общей дисперсии размеров на выходе операции, обусловленная влиянием неучтенных факторов. Так как σ_x, σ_y и b в уравнении (2.7) известны, то

$$\sigma_{yx}^2 = \sigma_y^2(1 - r_{yx}^2).$$

Рассмотрим пример корреляционного анализа точности обработки заготовок. Предположим, что изучалась зависимость диаметра вала, обрабатываемого на гидрокопировальном автомате (y), от диаметра исходной заготовки (x), полученной штамповкой. В результате измерений и расчетов установлено, что: $\overline{X} = 32$ мм; $\sigma_x = 0{,}24$ мм; $\overline{Y} = 30$ мм; $\sigma_y = 0{,}03$ мм; $r_{yx} = 0{,}8$.

В соответствии с вышеизложенным найдем коэффициенты уравнения связи $\overline{y}_x$ с x, т. е.

$$\overline{y}_x = a + bx.$$

Коэффициент $\quad b = r_{yx}\dfrac{\sigma_y}{\sigma_x} = 0{,}8\dfrac{0{,}03}{0{,}24} = 0{,}1;$

коэффициент $\quad a = \overline{Y} - b\overline{X} = 30 - 0{,}1 \cdot 32 = 26{,}8.$

В итоге получим

$$\overline{y}_x = 26{,}8 + 0{,}1x.$$

Определим зависимость между дисперсиями размеров заготовок на выходе и входе операции. Из уравнения (2.7) имеем

$$\sigma_{yx}^2 = \sigma_y^2 - b^2\sigma_x^2 = (0{,}03)^2 - (0{,}1)^2(0{,}24)^2 = 0{,}000324.$$

Таким образом, получим

$$\sigma_y^2 = 0{,}000324 + 0{,}01\sigma_x^2,$$

или

$$\sigma_y = \sqrt{0{,}000324 + 0{,}01\sigma_x^2}.$$

Используя это уравнение, теперь можем решить такую задачу. Допустим, что за счет технологических мероприятий удалось снизить σ_x с 0,24 до 0,1 мм. Тогда σ_y сократится с 0,03 до 0,02 мм, т. е. в 1,5 раза.

2.4. Точечные и точностные диаграммы

Такие диаграммы служат для оценки точности обработки заготовок во времени. Точечные и точностные диаграммы позволяют наиболее полно выявить изменения во времени как случайных, так и систематических погрешностей обработки.

Для построения точечной диаграммы по горизонтальной оси откладывают номера заготовок в порядке их схода со станка, а по вертикальной – в виде точек результаты измерений параметров их точности (например, размеров заготовок) (рис. 2.12, *а*). Точечные диаграммы можно строить как для одной, так и для нескольких последовательно обрабатываемых партий заготовок. Длину точечных диаграмм можно сократить, если откладывать не номера заготовок, а номера их групп, содержащих одинаковое число последовательно снимаемых со станка заготовок (рис. 2.12, *б*). Для того чтобы было легче проследить тенденции изменения размеров с течением времени, строят диаграмму, по вертикальной оси которой отложены средние арифметические значения размеров в группе заготовок (рис. 2.12, *в*).

Рис. 2.12. Точечные диаграммы

Точечные диаграммы используют при статистическом контроле качества продукции. При таком контроле периодически измеряют от 2 до 10 заготовок. Средние арифметические значения размера в этой группе заготовок наносят на контрольную диаграмму (рис. 2.12, *г*). На ней имеются прямые *а*, определяющие границы поля допуска размера, и прямые *б*, определяющие границы рассеивания средних арифметических значений в группе. Эти прямые находятся на основе теоретических положений статистического контроля. При выходе среднего арифметического значения в группе (А) за пределы, ограниченные линиями *а*, производят поднастройку станка. Таким образом при статистическом контроле сокращаются затраты на измерения заготовок, так как выборочной проверке подвергают только 5…10 % заготовок от их общего числа.

Рис. 2.13. Точностная диаграмма

На основе точечных диаграмм могут быть построены точностные диаграммы. Пример точностной диаграммы приведен на рис. 2.13. Для каждой группы последовательно обрабатываемых заготовок находят среднее арифметическое значение размера $x_{ср}$, среднее квадратическое отклонение σ, а также предельное верхнее $\xi_в$ и нижнее $\xi_н$ отклонения размера от $x_{ср}$. Число заготовок в каждой группе рекомендуется брать равным 25. Точностные диаграммы позволяют наиболее полно судить об изменении точности размера обрабатываемых заготовок во времени.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое распределение случайной величины?
2. Какими параметрами обычно характеризуется распределение случайной величины?

3. Почему в качестве меры рассеивания случайной величины обычно используют ее среднее квадратическое отклонение, а не дисперсию?

4. Как построить эмпирическую кривую распределения непрерывной случайной величины?

5. При каких условиях имеет место закон нормального распределения?

6. Что дает анализ точности (обработки, сборки) по кривым распределения?

7. Что дает корреляционный анализ точности?

8. Для чего служат точечные и точностные диаграммы?

3. ОСНОВЫ БАЗИРОВАНИЯ И РАЗМЕРНЫЕ ЦЕПИ

Задача обеспечения требуемой точности изготовления изделий, как уже отмечалось, является одной из важнейших в технологии машиностроения. Фундаментом для решения этой задачи являются основы базирования и теория размерных цепей.

3.1. Основы базирования

3.1.1. Общие понятия о базах и базировании

Для нормальной работы любой машины необходимо обеспечить определенное взаимное расположение ее деталей и сборочных единиц. При обработке заготовки должны быть с требуемой точностью установлены на столе станка или в приспособлении. Такая же задача возникает и при измерении, когда заготовка или изделие и измерительный инструмент (прибор, приспособление) также должны быть установлены с требуемой точностью относительно друг друга.

Процесс установки заготовки или изделия принято делить на базирование и закрепление. *Базирование* – это придание заготовке или изделию требуемого положения относительно выбранной системы координат. *Закрепление* – это приложение сил и пар сил к заготовке или изделию для обеспечения постоянства их положения, достигнутого при базировании.

Поверхность или выполняющее ту же функцию сочетание поверхностей, ось, точка, принадлежащая заготовке или изделию и используемая для базирования, называется *базой*.

При базировании заготовки и изделия рассматриваются как абсолютно твердые тела.

В основе правил базирования лежит известное в теоретической механике положение о том, что свободное абсолютно твердое тело имеет шесть степеней свободы в выбранной системе координат. Оно может перемещаться вдоль трех осей координат и вращаться вокруг них. Следовательно, для придания телу требуемого положения необходимо отнять указанные степени свободы. Для этого нужно задать (зафиксировать) шесть независимых координат тела. Причем каждая координата выступает в роли *двусторонней связи*, которая отнимает свободу перемещения вдоль этой координаты.

Рассмотрим сначала базирование призматической заготовки в системе координат XYZ (рис. 3.1, *а*). Для придания заготовке требуемого положения необходимо задать координаты *1-1′, 2-2′, 3-3′, 4-4′, 5-5′* и *6-6′*. Эти координаты лишают заготовку всех шести степеней свободы, а именно:

Рис. 3.1. Базирование призматической заготовки:
а – в системе координат XYZ; б – путем совмещения баз заготовки с установочными элементами приспособления

- координаты *1-1′, 2-2′* и *3-3′* – перемещения вдоль оси Z и вращения вокруг осей X и Y;
- координаты *4-4′* и *5-5′* – перемещения вдоль оси Y и вращения вокруг оси Z;
- координата *6-6′* – перемещения вдоль оси X.

Установка заготовки в приспособлении осуществляется путем совмещения ее баз с установочными элементами приспособления. В результате этого координаты заготовки превращаются в шесть опорных точек, расположенных на ее базах (рис. 3.1, *б*).

Аналогично определяется положение присоединяемой детали относительно другой (базовой), которое происходит путем совмещения их баз.

Таким образом, получим *правило шести точек*, в соответствии с которым для придания требуемого положения заготовке относительно приспособления (или присоединяемой детали относительно другой) необходимо и достаточно иметь шесть опорных точек, отнимающих у заготовки (присоединяемой детали) по одной степени свободы.

Эти опорные точки обычно располагаются на трех базах, которые принято называть *комплектом баз*.

Для обозначения опорной точки предусмотрен специальный знак (рис. 3.2). Схему расположения опорных точек на базах заготовки или изделия принято называть схемой базирования.

Рис. 3.2. Условное обозначение опорной точки:
а – на виде спереди и сбоку;
б – на виде сверху

Рис. 3.3. Схема базирования призматической заготовки

Все опорные точки на схеме базирования нумеруют порядковыми номерами, начиная с базы, на которой располагается наибольшее число опорных точек. При этом число проекций заготовки или изделия должно быть достаточным для однозначного представления о размещении опорных точек. При наложении в какой-либо проекции одной опорной точки на другую изображают одну точку и около нее проставляют номера совмещенных точек.

Схема базирования призматической заготовки для рассмотренного выше примера (см. рис. 3.1) приведена на рис. 3.3.

Теперь рассмотрим базирование валика и диска в прямоугольной системе координат XYZ. В этих случаях наряду с другими координатами чаще всего задают координаты точек, расположенных на оси цилиндрической поверхности заготовок (рис. 3.4).

Рис. 3.4. Базирование валика (а) и диска (б) в системе координат XYZ

Координаты *1-1′, 2-2′, 3-3′* и *4-4′* (рис. 3.4, *а*) лишают валик перемещений вдоль осей Y и Z и вращения вокруг этих же осей, координата *5-5′* – перемещения вдоль оси X и координата *6-6′* – вращения вокруг этой оси.

Вследствие малой длины цилиндрической поверхности диска можно задать координаты только двух точек, расположенных на его оси (рис. 3.4, *б*), зато на торце диска – координаты трех точек. Координаты *1-1′, 2-2′, 3-3′* лишают диск перемещения вдоль оси X и вращения вокруг осей Y и Z, координаты *4-4′* и *5-5′* – перемещений соответственно вдоль осей Y и Z и координата *6-6′* – вращения вокруг оси X.

Таким образом, валик и диск лишаются всех шести степеней свободы.

Схемы базирования валика и диска приведены на рис. 3.5, *а* и 3.5, *в*, а материализующие их схемы установки заготовок в самоцентрирующем патроне показаны на рис. 3.5, *б* и 3.5, *г*.

Рис. 3.5. Схемы базирования и соответствующие им схемы установки валика (а, б) и диска (в, г)

Необходимо подчеркнуть, что опорные точки *1, 2, 3* и *4* на схеме базирования валика (рис. 3.5, *а*) и опорные точки *4, 5* на схеме базирования диска (рис. 3.5, *в*) являются воображаемыми.

3.1.2. Классификация баз

Базы принято различать по назначению, по лишаемым степеням свободы и по характеру проявления.

По назначению базы делятся на конструкторские, технологические и измерительные.

Конструкторская база – это база, используемая для определения положения детали или сборочной единицы в изделии. Конструкторские базы, в свою очередь, делятся на основные и вспомогательные. *Основной* называется база, принадлежащая данной детали или сборочной единице и используемая для определения их положения в изделии. *Вспомогательной* называется база, принадлежащая данной детали или сборочной единице и используемая для определения положения присоединяемого к ним изделия. На рис. 3.6 приведен пример комплектов основных и вспомогательных баз детали (корпуса). Нужно отметить, что любая деталь может иметь только один комплект основных баз и столько комплектов вспомогательных баз, сколько деталей или сборочных единиц к ней присоединяется.

Рис. 3.6. Пример комплектов основных и вспомогательных баз детали (I, II, III – основные базы корпуса; IV, V, VI – его вспомогательные базы)

Технологическая база – это база, используемая для определения положения заготовки или изделия в процессе изготовления или ремонта. Некоторые примеры комплектов технологических баз были рассмотрены выше.

Измерительная база – это база, используемая для определения относительного положения заготовки или изделия и средств измерения. Пример измерительной базы дан на рис. 3.7.

Рис. 3.7. К понятию измерительных баз детали (А – измерительная база)

В зависимости от лишаемых степеней свободы базы делятся на установочную, направляющую, опорную, двойную направляющую и двойную опорную.

Установочная база лишает заготовку или изделие трех степеней свободы – перемещения вдоль одной координатной оси и вращения вокруг двух других осей. В рассмотренных выше примерах установочной базой являются нижняя плоскость призматической заготовки (рис. 3.3) и торец диска (рис. 3.5, *б*). Установочная база должна иметь по возможности наибольшую площадь, чтобы опорные точки можно было разнести как можно дальше друг от друга, обеспечив устойчивость заготовки или изделия.

Направляющая база лишает заготовку или изделие двух степеней свободы – перемещения вдоль одной координатной оси и вращения вокруг другой оси. Направляющей базой (см. рис. 3.3) является плоскость призматической заготовки, на которой располагаются опорные точки *4* и *5*. Направляющая база должна быть по возможности наиболее протяженной, чтобы опорные точки можно было разнести на наибольшее расстояние, обеспечив тем самым наименьший перекос заготовки или изделия в соответствующей координатной плоскости.

Опорная база лишает заготовку или изделие одной степени свободы – перемещения вдоль одной координатной оси или вращения вокруг одной координатной оси. В рассмотренных выше примерах опорной базой являются плоскость призматической заготовки (см. рис. 3.3), на которой находится опорная точка *6*, торец валика (см. рис. 3.5, *а*), на котором лежит опорная точка *5*, и боковые плоскости шпоночных пазов валика и диска (см. рис. 3.5, *а* и *в*), на которых располагаются опорные точки *6*. В качестве опорной базы может быть использована поверхность любых габаритных размеров.

Двойная направляющая база лишает заготовку или изделие четырех степеней свободы – перемещений вдоль двух координатных осей и вращения вокруг этих же осей. Эта база для обеспечения наименьших перекосов заготовки или изделия должна быть по возможности наиболее протяженной. Двойной направляющей базой является ось цилиндрической поверхности валика (см. рис. 3.5, *а*).

Часто двойную направляющую базу образует сочетание двух цилиндрических или конических поверхностей, а также сочетание цилиндрической и конической поверхностей. При этом каждая из названных поверхностей имеет небольшую протяженность. Роль двойной направляющей базы в одном случае могут выполнять шейки вала* (рис. 3.8), которыми

* В этом случае сама обрабатываемая поверхность является технологической базой.

его устанавливают на опору и ведущий круг при бесцентровом шлифовании, во втором – центровые отверстия, с помощью которых вал устанавливают в центрах на круглошлифовальных или токарных станках (рис. 3.9), в третьем – цилиндрическая поверхность и центровое отверстие вала, которыми его устанавливают соответственно в трехкулачковый самоцентрирующий патрон и задний центр токарного станка (рис. 3.10).

Рис. 3.8. Реализация двойной направляющей базы сочетанием цилиндрических поверхностей: 7 – заготовка вала; 8 – ведущий круг; 9 – опора; 10 – шлифующий круг; 11 – упор

Рис. 3.9. Реализация двойной направляющей базы центровыми отверстиями в заготовке

Рис. 3.10. Реализация двойной направляющей базы цилиндрической поверхностью и центровым отверстием

Двойная опорная база лишает заготовку или изделие двух степеней свободы – перемещения вдоль двух координатных осей. Примером двойной опорной базы является ось цилиндрической поверхности диска (см. рис. 3.5, *в*).

Комплекты баз, в первый из которых входят установочная, направляющая и опорная базы, во второй – двойная направляющая и две опорные базы, в третий – установочная, двойная опорная и опорная базы, называют типовыми.

По характеру проявления базы делят на явные и скрытые.

Явной называется база заготовки или изделия в виде реальной поверхности, разметочной риски или точки пересечения рисок.

Скрытой называется база заготовки или изделия в виде воображаемой плоскости, оси или точки.

В рассмотренных выше примерах по характеру проявления базы подразделяются следующим образом:

- у призматической заготовки (рис. 3.3) все три базы (установочная, направляющая и опорная) – явные;
- у валика (рис. 3.5, *а*) двойная направляющая база (ось его цилиндрической поверхности) – скрытая, опорные базы – явные;
- у диска (рис. 3.5, *в*) установочная и опорная базы – явные, двойная опорная база (ось цилиндрической поверхности диска) – скрытая;
- у вала (рис. 3.8) двойная направляющая база и одна опорная база (торец) – явные, другая опорная база – скрытая;
- у вала (рис. 3.9) двойная направляющая база (общая ось центровых отверстий) и две опорные базы (одной из которых является вершина конуса переднего центрового отверстия) – скрытые;
- у вала (рис. 3.10) двойная направляющая база (общая ось участка цилиндрической поверхности и центрового отверстия) и одна опорная база – скрытые, другая опорная база (торец) – явная.

Рис. 3.11. Классификация баз

Необходимо подчеркнуть следующее. Опорная точка *б*, расположенная на скрытых опорных базах (рис. 3.8–3.10), – это символ того, что вал в каждый момент времени занимает вполне определенное угловое положение в системе координат станка, т. е. относительно опоры и ведущего круга бесцентрово-шлифовального станка (рис. 3.8), центров круглошлифовального станка (рис. 3.9), трехкулачкового патрона токарного станка (рис. 3.10).

На рис. 3.11 приведена схема классификации баз. В соответствии с этой схемой полное название базы должно охватывать все три классификационных признака. Например, положение вала (рис. 3.8) определяют базы: технологическая двойная направляющая явная, технологическая опорная явная, технологическая опорная скрытая. Допускается и упрощенное название баз, отражающее только те классификационные признаки, которые представляют интерес в данный момент времени: двойная направляющая скрытая база, установочная явная база, направляющая база и т. п.

3.2. Основы теории размерных цепей

3.2.1. Основные понятия и определения

Размерной цепью называется совокупность размеров, непосредственно участвующих в решении поставленной задачи и образующих замкнутый контур.

Например, совокупность размеров A_1, A_2 и A_Δ (рис. 3.12, *а*) образуют размерную цепь, которая определяет величину зазора A_Δ.

Размерные цепи принято изображать в виде отдельных схем (рис. 3.12, *б, г*).

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

Звеньями размерных цепей могут быть как линейные (рис. 3.12, *а*), так и угловые размеры (рис. 3.12, *в*).

Звенья – линейные размеры – принято обозначать прописными буквами русского алфавита (А, Б, …), а звенья – угловые размеры – строчными буквами греческого алфавита (β, γ, …) за исключением букв α, δ, ξ, λ, ω. В отдельных случаях могут быть использованы и другие обозначения.

В любой размерной цепи одно из звеньев является замыкающим, а остальные – составляющими звеньями.

Замыкающим называют звено размерной цепи, являющееся исходным при постановке задачи или получающееся последним в результате ее решения.

Например, очевидно, что именно исходя из требуемого значения зазора A_Δ (рис. 3.12, *а*) следует определять значения звеньев A_1 и A_2. Поэтому звено A_Δ в рассматриваемой размерной цепи является замыкающим. Очевидно также, что это звено при сборке механизма будет получено последним. То же самое можно сказать о звене β_Δ, рассматривая размерную цепь, показанную на рис. 3.12, *в*.

Рис. 3.12. Конструкторские размерные цепи

Замыкающее звено обозначается индексом Δ.

Составляющие звенья размерной цепи делятся на увеличивающие и уменьшающие.

Увеличивающим звеном называют такое, с увеличением которого замыкающее звено увеличивается.

Уменьшающим звеном называют такое, с увеличением которого замыкающее звено уменьшается.

В размерной цепи, показанной на рис. 3.12, *а*, звено A_1 – увеличивающее, а звено A_2 – уменьшающее.

Увеличивающие звенья обозначаются стрелкой над буквой, направленной вправо ($\vec{A}_1$), а уменьшающие – стрелкой, направленной влево ($\overleftarrow{A}_2$).

Задача выделения увеличивающих и уменьшающих звеньев для коротких размерных цепей оказывается достаточно простой. С увеличением числа звеньев в размерной цепи эта задача усложняется, и для облегчения ее решения целесообразно использовать следующий прием. Замыкающему звену условно присваивают индекс уменьшающего, т. е. стрелка над обозначающей его буквой направляется влево (рис. 3.13). Затем проводится мысленный обход размерного контура по этой стрелке, и в направлении обхода расставляются стрелки над буквами, обозначающими составляющие звенья. Если стрелка будет направлена вправо – звено увеличивающее, а если влево – уменьшающее.

Рис. 3.13. Схема размерной цепи. Линией со стрелками показана последовательность «обхода» размерного контура для выделения увеличивающих и уменьшающих звеньев

Размерные цепи по назначению делятся на *конструкторские, технологические и измерительные.* Первые используют на этапе конструирования изделий, вторые – на этапе их изготовления, третьи – при измерении деталей.

Конструкторские размерные цепи делят на сборочные и подетальные. Примерами сборочных размерных цепей являются цепи, показанные на рис. 3.12. Пример подетальной размерной цепи приведен на рис. 3.14. Здесь A_1 и A_2 – составляющие звенья (их значения указывают на чертеже детали); A_Δ – замыкающее звено (его значение на чертеже не приводят).

Рис. 3.14. Подетальная размерная цепь

Технологические размерные цепи возникают при сборке машины и при обработке заготовок (изготовлении деталей).

а

б

Рис. 3.15. Технологические размерные цепи, возникающие при обработке заготовок: а – первого вида; б – второго вида

Технологические размерные цепи, формирующиеся при обработке заготовок, делятся на два вида. В технологических размерных цепях первого вида составляющими звеньями A_i являются размеры станка, приспособления и инструмента, а замыкающим звеном – размер обработанной заготовки A_Δ (рис. 3.15, *а*). В технологических размерных цепях второго вида составляющими звеньями являются технологические размеры заготовки, получаемые на разных операциях. Замыкающими звеньями в этих цепях выступают конструкторские (чертежные) размеры детали и размеры припусков на обработку. На рис. 3.15, *б* показана схема шлифования торца заготовки на плоскошлифовальном станке и технологические размерные цепи второго вида. Конструкторский размер K (размер фаски) является замыкающим звеном в размерной цепи с составляющими звеньями A_1, A_2 и A_3, припуск Z оказывается замыкающим звеном в размерной цепи с составляющими звеньями A_1 и A_3. (Технологические размеры A_1 и A_2 получены при выполнении предшествующей токарной операции, технологический размер A_3 выдерживается при шлифовании торца.)

Звенья размерной цепи могут располагаться в одной или нескольких параллельных плоскостях и в непараллельных плоскостях. В первом случае размерную цепь называют *плоской,* во втором – *пространственной.* Причем в плоских размерных цепях звенья могут быть как параллельны, так и не параллельны друг другу. На рис. 3.16 показана плоская размерная цепь, составляющее звено A_3 которой расположено под углом α к направлению замыкающего звена. Такое звено включается в размерную цепь своей проекцией (A_3') на это направление. Причем угол α считается постоянным и $A_3' = A_3 \cos\alpha$. Предположим, что звено $A_3 = 100^{+0,6}_{-0,2}$, а угол $\alpha = 30^\circ$. Номинальное значение этого звена составит

$$A_3' = A_3 \cos\alpha = A_3 \cos 30^\circ = 100 \cdot 0,866 = 86,6 \text{ (мм)}.$$

Предельные отклонения звена A_3' будут

$$\Delta_в A_3' = \Delta_в A_3 \cdot \cos\alpha = \Delta_в A_3 \cdot \cos 30^\circ = 0,6 \cdot 0,866 = 0,52 \text{ (мм)};$$

$$\Delta_н A_3' = \Delta_н A_3 \cdot \cos\alpha = \Delta_н A_3 \cdot \cos 30^\circ = -0,2 \cdot 0,866 = -0,17 \text{ (мм)}.$$

Следовательно, $A_3' = 86,6^{+0,52}_{-0,17}$ мм.

Рис. 3.16. Плоская размерная цепь с непараллельными звеньями

Таким образом, любая плоская размерная цепь с непараллельными звеньями может быть сведена к плоской размерной цепи с параллельными звеньями.

Рис. 3.17. Три вида связей размерных цепей:
а – параллельный; б – последовательный; в – параллельно-последовательный

Отдельные размерные цепи могут быть связаны между собой. *Параллельно-связанными* называют размерные цепи, имеющие одно или несколько общих составляющих звеньев. *Последовательно-связанными* называют размерные цепи, из которых каждая последующая имеет общую базу с предыдущей. Размерные цепи с комбинированной связью имеют между собой как параллельные, так и последовательные связи. Примеры размерных цепей с различными связями приведены на рис. 3.17. Видно (рис. 3.17, *а*), что у размерных цепей А ($А_1$, $А_2$, $А_3$, $А_\Delta$) и Б ($Б_1$, $Б_2$, $Б_3$, $Б_\Delta$) имеется два общих составляющих звена – $А_3 = Б_2$ и $А_2 = Б_3$. У размерных цепей А и В (рис. 3.17, *б*) есть общая база. У размерных цепей А, Б и В, показанных на рис. 3.17, *в*, имеются как параллельные, так и последовательные связи.

3.2.2. Основные уравнения

Найдем зависимости между основными параметрами замыкающего звена и составляющих звеньев плоской размерной цепи с параллельными звеньями. Для этого сначала обратимся к рис. 3.12, *а*.

Очевидно, что номинальное значение замыкающего звена $А_\Delta$ составит

$$А_\Delta = \vec{А}_1 - \overleftarrow{А}_2 .$$

В общем случае при n увеличивающих и p уменьшающих звеньях в размерной цепи получим:

$$А_\Delta = \sum_{i=1}^{n} \vec{А}_i - \sum_{i=1}^{p} \overleftarrow{А}_i . \qquad (3.1)$$

Это уравнение принято называть уравнением размерной цепи или уравнением номиналов.

Используя понятие передаточного отношения ξ_i, которое равно +1 для увеличивающих и –1 для уменьшающих звеньев, уравнение размерной цепи можно записать в более компактной форме

$$\mathrm{A}_\Delta = \sum_{i=1}^{n+p} \xi_i \mathrm{A}_i. \tag{3.2}$$

Очевидно (рис. 3.12, *а*), что наибольшее и наименьшее предельные значения замыкающего звена A_Δ выразятся через предельные значения составляющих звеньев $\vec{\mathrm{A}}_1$ и $\overleftarrow{\mathrm{A}}_2$ следующим образом:

$$\mathrm{A}_{\Delta_{\text{нб}}} = \vec{\mathrm{A}}_{1_{\text{нб}}} - \overleftarrow{\mathrm{A}}_{2_{\text{нм}}};$$

$$\mathrm{A}_{\Delta_{\text{нм}}} = \vec{\mathrm{A}}_{1_{\text{нм}}} - \overleftarrow{\mathrm{A}}_{2_{\text{нб}}}.$$

В общем случае

$$\mathrm{A}_{\Delta_{\text{нб}}} = \sum_{i=1}^{n} \vec{\mathrm{A}}_{i_{\text{нб}}} - \sum_{i=1}^{p} \overleftarrow{\mathrm{A}}_{i_{\text{нм}}}; \tag{3.3}$$

$$\mathrm{A}_{\Delta_{\text{нм}}} = \sum_{i=1}^{n} \vec{\mathrm{A}}_{i_{\text{нм}}} - \sum_{i=1}^{p} \overleftarrow{\mathrm{A}}_{i_{\text{нб}}}. \tag{3.4}$$

Для установления зависимости между допуском замыкающего звена и допусками составляющих звеньев размерной цепи вычтем почленно из уравнения (3.3) уравнение (3.4). При этом получим:

$$\mathrm{TA}_\Delta = \sum_{i=1}^{n} \mathrm{T}\vec{\mathrm{A}}_i + \sum_{i=1}^{p} \mathrm{T}\overleftarrow{\mathrm{A}}_i$$

или окончательно

$$\mathrm{TA}_\Delta = \sum_{i=1}^{n+p} \mathrm{TA}_i, \tag{3.5}$$

т. е. *допуск замыкающего звена равен сумме допусков составляющих звеньев*.

Найдем зависимости между предельными отклонениями замыкающего звена и составляющих звеньев размерной цепи. Из схемы, приведенной на рис. 3.18, следует, что наибольшее и наименьшее предельные значения составляющих звеньев и замыкающего звена могут быть записаны в виде

$$\mathrm{A}_{i_{\text{нб}}} = \mathrm{A}_i + \Delta_{\text{в}}\mathrm{A}_i; \tag{3.6}$$

$$\mathrm{A}_{i_{\text{нм}}} = \mathrm{A}_i + \Delta_{\text{н}}\mathrm{A}_i; \tag{3.7}$$

$$A_{\Delta_{нб}} = A_\Delta + \Delta_в A_\Delta; \quad (3.8)$$

$$A_{\Delta_{нм}} = A_\Delta + \Delta_н A_\Delta. \quad (3.9)$$

В выражениях (3.6–3.9) $\Delta_в A_i$, $\Delta_в A_\Delta$ – верхние отклонения составляющих звеньев и замыкающего звена; $\Delta_н A_i$, $\Delta_н A_\Delta$ – их нижние отклонения. Подставляя эти выражения в уравнения (3.3) и (3.4), будем иметь:

$$A_\Delta + \Delta_в A_\Delta = \sum_{i=1}^{n}(\vec{A}_i + \Delta_в \vec{A}_i) - \sum_{i=1}^{p}(\overleftarrow{A}_i + \Delta_н \overleftarrow{A}_i);$$

$$A_\Delta + \Delta_н A_\Delta = \sum_{i=1}^{n}(\vec{A}_i + \Delta_н \vec{A}_i) - \sum_{i=1}^{p}(\overleftarrow{A}_i + \Delta_в \overleftarrow{A}_i).$$

Рис. 3.18. Схема размеров, допуска и отклонений

Вычитая почленно из этих уравнений уравнение (3.1), получим:

$$\Delta_в A_\Delta = \sum_{i=1}^{n}\Delta_в \vec{A}_i - \sum_{i=1}^{p}\Delta_н \overleftarrow{A}_i; \quad (3.10)$$

$$\Delta_н A_\Delta = \sum_{i=1}^{n}\Delta_н \vec{A}_i - \sum_{i=1}^{p}\Delta_в \overleftarrow{A}_i. \quad (3.11)$$

Таким образом, *верхнее отклонение замыкающего звена равно разности сумм верхних отклонений увеличивающих звеньев и нижних отклонений уменьшающих звеньев, а нижнее отклонение замыкающего звена равно разности сумм нижних отклонений увеличивающих звеньев и верхних отклонений уменьшающих звеньев*.

Установим зависимость между координатой середины поля допуска замыкающего звена ($\Delta_0 A_\Delta$) и координатами середин полей допусков со-

ставляющих звеньев ($\Delta_0 A_i$). Для этого в соответствии со схемой (рис. 3.18) выразим предельные отклонения замыкающего звена и составляющих звеньев через координату середины поля допуска и допуск

$$\Delta_{в} A_{\Delta} = \Delta_0 A_{\Delta} + \frac{TA_{\Delta}}{2}; \tag{3.12}$$

$$\Delta_{н} A_{\Delta} = \Delta_0 A_{\Delta} - \frac{TA_{\Delta}}{2}; \tag{3.13}$$

$$\Delta_{в} A_i = \Delta_0 A_i + \frac{TA_i}{2}; \tag{3.14}$$

$$\Delta_{н} A_i = \Delta_0 A_i - \frac{TA_i}{2}. \tag{3.15}$$

Подставляя эти выражения в уравнения (3.10) и (3.11), имеем

$$\Delta_0 A_{\Delta} + \frac{TA_{\Delta}}{2} = \sum_{i=1}^{n}\left(\Delta_0 \vec{A}_i + \frac{T\vec{A}_i}{2}\right) - \sum_{i=1}^{p}\left(\Delta_0 \overleftarrow{A}_i - \frac{T\overleftarrow{A}_i}{2}\right);$$

$$\Delta_0 A_{\Delta} - \frac{TA_{\Delta}}{2} = \sum_{i=1}^{n}\left(\Delta_0 \vec{A}_i - \frac{T\vec{A}_i}{2}\right) - \sum_{i=1}^{p}\left(\Delta_0 \overleftarrow{A}_i + \frac{T\overleftarrow{A}_i}{2}\right).$$

Сложив почленно эти уравнения и разделив левую и правую части полученного в результате этого равенства на 2, получим следующую зависимость:

$$\Delta_0 A_{\Delta} = \sum_{i=1}^{n} \Delta_0 \vec{A}_i - \sum_{i=1}^{p} \Delta_0 \overleftarrow{A}_i, \tag{3.16}$$

т. е. *координата середины поля допуска замыкающего звена равна разности сумм координат середин полей допусков увеличивающих и уменьшающих звеньев*.

Если ввести передаточные отношения, то уравнение (3.16) примет вид

$$\Delta_0 A_{\Delta} = \sum_{i=1}^{n+p} \xi_i \Delta_0 A_i. \tag{3.17}$$

Выразим среднее значение замыкающего звена ($A_{\Delta_{ср}}$) через средние значения составляющих звеньев ($A_{i_{ср}}$). Для этого сложим почленно уравнение (3.16) и уравнение (3.1) В результате получим

$$\Delta_0 A_{\Delta} + A_{\Delta} = \sum_{i=1}^{n}(\Delta_0 \vec{A}_i + \vec{A}_i) - \sum_{i=1}^{p}(\Delta_0 \overleftarrow{A}_i + \overleftarrow{A}_i).$$

Учитывая, что (см. рис. 3.18)

$$\Delta_0 A_\Delta + A_\Delta = A_{\Delta_{ср}};$$

$$\Delta_0 A_i + A_i = A_{i_{ср}},$$

будем иметь

$$A_{\Delta_{ср}} = \sum_{i=1}^{n} \vec{A}_{i_{ср}} - \sum_{i=1}^{p} \overleftarrow{A}_{i_{ср}}, \qquad (3.18)$$

т. е. *среднее значение замыкающего звена равно разности сумм средних значений увеличивающих и уменьшающих звеньев*.

Используя передаточные отношения, уравнение (3.18) можно записать в виде

$$A_{\Delta_{ср}} = \sum_{i=1}^{n+p} \xi_i A_{i_{ср}}. \qquad (3.19)$$

Зависимости (3.3)–(3.5) и (3.10)–(3.11) получены в предположении, что в размерной цепи возможно одновременное сочетание наибольших увеличивающих и наименьших уменьшающих звеньев или их обратное сочетание. Метод расчета размерных цепей, основанный на использовании этих зависимостей, получил название *метода максимума-минимума.* Он обеспечивает полную взаимозаменяемость, исключая появление брака.

Между тем вероятность такого сочетания составляющих звеньев у конкретного изделия весьма мала. Указанное обстоятельство, а также законы распределения размеров этих звеньев учитываются в *вероятностном методе* расчета размерных цепей, который отличается от метода максимума-минимума расчетом допуска замыкающего звена.

Полагая, что распределения размеров составляющих звеньев соответствуют нормальному закону, а границы полей рассеивания $\omega_i = 6\sigma_{A_i}$ совпадают с границами их полей допусков, можно принять:

$$TA_i = 6\sigma_{A_i},$$

или

$$\sigma_{A_i} = \frac{1}{6} TA_i. \qquad (3.20)$$

Так как среднее значение замыкающего звена представляет собой алгебраическую сумму средних значений составляющих звеньев, то в соответствии с известной в теории вероятностей теоремой о дисперсии суммы независимых случайных величин (составляющих звеньев) будем иметь:

$$\sigma^2_{A_\Delta} = \sum_{i=1}^{n+p} \sigma^2_{A_i}.$$

Учитывая соотношение (3.20), можем записать:

$$(\mathrm{TA}_\Delta)^2 = \sum_{i=1}^{n+p} (\mathrm{TA}_i)^2,$$

или

$$\mathrm{TA}_\Delta = \sqrt{\sum_{i=1}^{n+p} \left(\mathrm{TA}_i\right)^2}. \qquad (3.21)$$

Отметим, что при расчете по формуле (3.21) у 0,27 % изделий значение замыкающего звена может выйти за пределы допуска.

В общем случае, в том числе при распределениях размеров составляющих звеньев, отличающихся от нормального, допуск замыкающего звена плоской размерной цепи с параллельными звеньями определяется по формуле

$$\mathrm{TA}_\Delta = t_\Delta \sqrt{\sum_{i=1}^{n+p} \lambda_i^2 \left(\mathrm{TA}_i\right)^2}, \qquad (3.22)$$

где t_Δ – коэффициент риска; λ_i – относительное среднее квадратическое отклонение (безразмерный коэффициент).

Это отклонение находится из соотношения

$$\lambda_i = \frac{2\sigma_{\mathrm{A}_i}}{\omega_i},$$

или

$$\lambda_i = \frac{2\sigma_{\mathrm{A}_i}}{\mathrm{TA}_i}.$$

Коэффициент риска t_Δ определяет вероятность попадания размеров замыкающего звена в пределы его поля допуска. Этот коэффициент выбирают из таблиц значений функции Лапласа $\Phi(t)$ в зависимости от принятого риска Р.

При нормальном законе распределения размеров замыкающего звена и равновероятном его выходе за обе границы поля допуска значение Р, % связано со значением $\Phi(t)$ формулой

$$\mathrm{P} = 100\left[1 - 2\Phi(t)\right]. \qquad (3.23)$$

Ряд значений коэффициента t_Δ приведен в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Риск Р, %	32	23	16	9	4,6	2,1	0,94	0,51	0,27	0,1
Коэффициент t_Δ	1	1,2	1,4	1,7	2	2,3	2,6	2,8	3	3,3

Значения коэффициента λ_i^2 составляют:

- при нормальном законе (законе Гаусса) распределения размеров составляющих звеньев $\lambda_i^2 = 1/9$;
- распределении по закону Симпсона (равнобедренного треугольника) $\lambda_i^2 = 1/6$;
- распределении по закону равной вероятности $\lambda_i^2 = 1/3$.

Нормальное распределение размеров чаще всего имеет место при крупносерийном и массовом производстве изделий, распределение по закону Симпсона – при серийном производстве, распределение по закону равной вероятности – при единичном производстве.

Если принять, что распределение размеров составляющих звеньев является нормальным, а риск P = 0,27 %, то $\lambda_i^2 = 1/9$, коэффициент $t_\Delta = 3$ (см. табл. 3.1) и формула (3.22) преобразуется в формулу (3.21).

При расчетах размерных цепей возникают две основные задачи: прямая (проектная) и обратная (проверочная).

Прямая задача состоит в том, чтобы по известным номинальным значениям всех звеньев размерной цепи, допуску и предельным отклонениям замыкающего звена определить допуски и предельные отклонения составляющих звеньев.

Обратная задача заключается в том, чтобы по известным номинальным значениям, допускам и предельным отклонениям составляющих звеньев определить номинальное значение, допуск и предельные отклонения замыкающего звена.

3.2.3. Методы достижения точности замыкающих звеньев размерных цепей

Задача обеспечения требуемой точности замыкающих звеньев размерных цепей может быть экономично решена одним из пяти методов: полной взаимозаменяемости, неполной взаимозаменяемости, групповой взаимозаменяемости, пригонки или регулирования.

Рассмотрим решение этой задачи различными методами на примере размерной цепи, приведенной на рис. 3.19.

Рис. 3.19. Размерная цепь механизма

3.2.3.1. Метод полной взаимозаменяемости

При этом методе требуемая точность замыкающего звена размерной цепи достигается во всех случаях ее реализации путем включения в нее составляющих звеньев без выбора, подбора или изменения их значений.

Широкое использование метода полной взаимозаменяемости объясняется следующими его преимуществами:

- простотой достижения требуемой точности замыкающего звена (например, использование этого метода при сборке сводит последнюю в простое соединение деталей);
- возможностью широкого кооперирования различных цехов и заводов при изготовлении отдельных деталей и сборочных единиц изделий;
- возможностью выполнения сборочных операций рабочими невысокой квалификации;
- простотой нормирования технологических процессов сборки.

Допуск и предельные отклонения составляющих звеньев размерной цепи рассчитывают методом максимума-минимума.

Расчет ведется в следующей последовательности.

1. Производится распределение допуска замыкающего звена между допусками составляющих звеньев. Эта локальная задача является многовариантной, так как для ее решения имеется только одно уравнение (3.5).

Для ориентировочных оценок допусков составляющих звеньев чаще всего используют способ равных допусков (равных влияний). В соответствии с ним допуск каждого составляющего звена принимают одним и тем же. Этот допуск [средний допуск $(\mathrm{TA}_i)_{\text{ср}}$] находят путем деления допуска замыкающего звена на число составляющих звеньев, т. е.

$$\left(\mathrm{TA}_i\right)_{\text{ср}} = \frac{\mathrm{TA}_\Delta}{n+p}.$$

Затем найденные указанным образом допуски составляющих звеньев корректируют с учетом сложности достижения точности каждого составляющего звена. В итоге стремятся снизить затраты на изготовление изделия.

Для рассматриваемого примера (рис. 3.19)

$$\left(\mathrm{TA}_i\right)_{\text{ср}} = \frac{0,2}{3} \cong 0,067 \text{ мм.}$$

Наиболее сложным является обеспечение точности звена A_2 – расстояния между внутренними стенками корпуса, поэтому допуск этого звена желательно взять значительно бóльшим допусков звеньев A_1 и A_3. С учетом этого подбором устанавливаем: $\mathrm{TA}_1 = 0,03$ мм; $\mathrm{TA}_2 = 0,15$ мм; $\mathrm{TA}_3 = 0,02$ мм.

2. На все составляющие звенья, кроме одного, назначаются предельные отклонения. Обычно для размеров отверстий (охватывающих размеров) отклонения назначаются по *H*, для валов (охватываемых размеров) – по h, для остальных – симметричные отклонения.

Принимаем: $\mathrm{A}_1 = 45_{-0,03}$ мм; $\mathrm{A}_2 = 50^{+0,15}$ мм.

3. Для определения предельных отклонений «оставшегося» звена сначала с помощью уравнения (3.16) находится координата середины поля допуска этого звена. Затем с использованием соотношений (3.14) и (3.15) уже определяются сами отклонения.

Для рассматриваемого примера «оставшимся» звеном является A_3. Находим координату середины допуска этого звена

$$\Delta_0\mathrm{A}_\Delta = \Delta_0\vec{\mathrm{A}}_2 - \Delta_0\overleftarrow{\mathrm{A}}_1 - \Delta_0\overleftarrow{\mathrm{A}}_3;$$

$$0,1 = 0,075 - (-0,015) - \Delta_0\mathrm{A}_3.$$

Отсюда

$$\Delta_0\mathrm{A}_3 = -0,01 \text{ мм.}$$

Предельные отклонения звена A_3 составят:

$$\Delta_{\text{в}}\mathrm{A}_3 = \Delta_0\mathrm{A}_3 + \frac{\mathrm{TA}_3}{2} = -0,01 + \frac{0,02}{2} = 0 \text{ мм;}$$

$$\Delta_{\text{н}}\mathrm{A}_3 = \Delta_0\mathrm{A}_3 - \frac{\mathrm{TA}_3}{2} = -0,01 - \frac{0,02}{2} = -0,02 \text{ мм.}$$

Таким образом, получим $\mathrm{A}_3 = 5_{-0,02}$ мм.

Правильность решения прямой задачи проверим, решив обратную задачу.

1. С помощью уравнения (3.1) найдем номинальное значение замыкающего звена

$$A_\Delta = \vec{A}_2 - \overleftarrow{A}_1 - \overleftarrow{A}_3 = 50 - 45 - 5 = 0 \text{ мм.}$$

2. С помощью уравнений (3.10) и (3.11) определим его предельные отклонения

$$\Delta_в A_\Delta = \Delta_в A_2 - \Delta_н A_1 - \Delta_н A_3 = 0{,}15 - (-0{,}03) - (-0{,}02) = 0{,}2 \text{ мм;}$$

$$\Delta_н A_\Delta = \Delta_н A_2 - \Delta_в A_1 - \Delta_в A_3 = 0 - 0 - 0 = 0 \text{ мм.}$$

Таким образом, получим $A_\Delta = 0^{+0,2}$ мм, т. е. прямая задача решена верно.

Метод полной взаимозаменяемости, учитывающий возможность самого неблагоприятного сочетания предельных отклонений составляющих звеньев, часто приводит к очень жестким (неэкономичным) допускам этих звеньев. Считается, что экономически оправданной областью применения метода полной взаимозаменяемости являются размерные цепи с небольшим числом звеньев (обычно $n + p \le 4$) и относительно широким допуском замыкающего звена.

3.2.3.2. Метод неполной взаимозаменяемости

Суть метода состоит в том, что требуемая точность замыкающего звена размерной цепи достигается с некоторым заранее установленным риском путем включения в нее составляющих звеньев без выбора, подбора или изменения их значений. Преднамеренный риск выхода значений замыкающего звена за пределы допуска обычно невелик. Однако этот риск дает возможность (как будет показано ниже) очень существенно расширить допуски составляющих звеньев по сравнению с допусками, установленными методом полной взаимозаменяемости и тем самым значительно снизить затраты на изготовление деталей и изделий в целом.

При методе неполной взаимозаменяемости расчет допусков составляющих звеньев ведется с использованием уравнения (3.22), полученного на основе положений теории вероятностей.

Решение прямой задачи рассмотренным методом производится следующим образом.

1. Задаемся значениями коэффициента риска t_Δ и относительного среднего квадратического отклонения λ_i. Для рассматриваемого примера (рис. 3.19) примем, что риск P = 1 %, при котором t_Δ = 2,57 (см. табл. 3.1). Считая, что распределение размеров составляющих звеньев соответствует закону Гаусса, берем λ_i^2 = 1/9.

Для ориентировочных оценок допусков составляющих звеньев определяем средний допуск $\left(\mathrm{TA}_i\right)_{\text{ср}}$ по формуле

$$\left(\mathrm{TA}_i\right)_{\text{ср}} = \frac{\mathrm{TA}_\Delta}{t_\Delta \sqrt{\lambda_i^2 (n+p)}},$$

вытекающей из формулы (3.22). Для рассматриваемого примера получим

$$\left(\mathrm{TA}_i\right)_{\text{ср}} = \frac{0,2}{2,57\sqrt{\frac{1}{9}\cdot 3}} = 0,135 \text{ мм.}$$

2. Используя формулу (3.22), подбором устанавливаем следующие допуски составляющих звеньев: $\mathrm{TA}_1 = 0,1$ мм; $\mathrm{TA}_2 = 0,2$ мм; $\mathrm{TA}_3 =$ $= 0,06$ мм.

Правильность подбора допусков проверяем по формуле (3.22):

$$\mathrm{TA}_\Delta = t_\Delta \sqrt{\sum_{i=1}^{n+p} \lambda_i^2 \left(\mathrm{TA}_i\right)^2} = 2,57\sqrt{1/9\left[\left(0,1\right)^2 + \left(0,2\right)^2 + \left(0,06\right)^2\right]} = 0,2 \text{ мм.}$$

В дальнейшем решение прямой задачи совпадает с ее решением методом максимума-минимума.

3. На все составляющие звенья, кроме одного, назначаем предельные отклонения. Принимаем:

$$\mathrm{A}_1 = 45_{-0,1} \text{ мм; } \mathrm{A}_2 = 50^{+0,2} \text{ мм.}$$

4. Находим координату середины поля допуска звена A_3

$$\Delta_0 \mathrm{A}_\Delta = \Delta_0 \vec{\mathrm{A}}_2 - \Delta_0 \overleftarrow{\mathrm{A}}_1 - \Delta_0 \overleftarrow{\mathrm{A}}_3;$$
$$0,1 = 0,1 - (-0,05) - \Delta_o \mathrm{A}_3.$$

Отсюда

$$\Delta_0 \mathrm{A}_3 = 0,05 \text{ мм.}$$

Находим предельные отклонения звена A_3:

$$\Delta_{\text{в}} \mathrm{A}_3 = \Delta_0 \mathrm{A}_3 + \frac{\mathrm{TA}_3}{2} = 0,05 + \frac{0,06}{2} = 0,08 \text{ мм;}$$

$$\Delta_{\text{н}} \mathrm{A}_3 = \Delta_0 \mathrm{A}_3 - \frac{\mathrm{TA}_3}{2} = 0,05 - \frac{0,06}{2} = 0,02 \text{ мм.}$$

Таким образом, получим $\mathrm{A}_3 = 5^{+0,08}_{+0,02}$ мм.

Правильность решения прямой задачи проверим, решив обратную задачу.

1. С помощью уравнения (3.1) найдем номинальное значение замыкающего звена

$$\mathrm{A}_\Delta = \vec{\mathrm{A}}_2 - \overleftarrow{\mathrm{A}}_1 - \overleftarrow{\mathrm{A}}_3 = 50 - 45 - 5 = 0 \text{ мм.}$$

2. Найдем координату середины поля допуска замыкающего звена

$$\Delta_0 A_\Delta = \Delta_0 \vec{A}_2 - \Delta_0 \overleftarrow{A}_1 - \Delta_0 \overleftarrow{A}_3 = 0{,}1 - (-0{,}05) - (-0{,}05) = 0{,}1 \text{ мм.}$$

3. Определим предельные отклонения замыкающего звена

$$\Delta_в A_\Delta = \Delta_0 A_\Delta + \frac{TA_\Delta}{2} = 0{,}1 + \frac{0{,}2}{2} = 0{,}2 \text{ мм;}$$

$$\Delta_н A_\Delta = \Delta_0 A_\Delta - \frac{TA_Д}{2} = 0{,}1 - \frac{0{,}2}{2} = 0 \text{ мм.}$$

Таким образом, получим $A_\Delta = 0^{+0{,}2}$ мм, т. е. прямая задача решена верно.

Таблица 3.2

Результаты расчетов допусков и предельных отклонений составляющих звеньев

Метод обеспечения точности замыкающего звена	Составляющие звенья		
	A_1	A_2	A_3
Полной взаимозаменяемости	$45_{-0{,}03}$	$50^{+0{,}15}$	$5_{-0{,}02}$
Неполной взаимозаменяемости	$45_{-0{,}1}$	$50^{+0{,}2}$	$5^{+0{,}08}_{+0{,}02}$

В табл. 3.2 сопоставлены результаты расчетов допусков и предельных отклонений составляющих звеньев рассматриваемой размерной цепи (рис. 3.19), выполненных методом полной и неполной взаимозаменяемости. Видно, что метод неполной взаимозаменяемости по сравнению с методом полной взаимозаменяемости позволяет даже для коротких размерных цепей значительно увеличить допуски составляющих звеньев. Экономический эффект от использования метода неполной взаимозаменяемости вместо метода полной взаимозаменяемости возрастает с уменьшением допуска замыкающего звена и увеличением числа звеньев размерной цепи.

3.2.3.3. Метод групповой взаимозаменяемости

При этом методе требуемая точность замыкающего звена достигается путем включения в размерную цепь составляющих звеньев, принадлежащих к соответственным группам, на которые они предварительно рассортированы.

Метод групповой взаимозаменяемости (называемый иногда селективной сборкой) обычно применяют при малом допуске замыкающего звена, обеспечить который методом неполной взаимозаменяемости оказывается затруднительно или даже невозможно. При использовании метода групповой взаимозаменяемости заданный допуск замыкающего зве-

на TA_Δ увеличивают в N раз (N – целое число). Расширенный допуск $T'A_\Delta = TA_\Delta \cdot N$, часто называемый производственным допуском, используют для расчета допусков составляющих звеньев размерной цепи. Детали, изготовленные с такими относительно широкими допусками, сортируют по размерам на N групп и каждой присваивают номер. Изделия собирают из деталей, принадлежащих к одной группе, что обеспечивает требуемый допуск замыкающего звена TA_Δ.

Таким образом, при сборке изделий из деталей, принадлежащих к одной группе, допуск замыкающего звена TA_Δ обеспечивается методом полной взаимозаменяемости.

При оценке экономической эффективности данного метода необходимо учитывать дополнительные расходы, связанные с точным измерением и сортировкой деталей по группам, их маркировкой и хранением. Организационные трудности и расходы возрастают при увеличении числа звеньев в размерной цепи и числа групп деталей. Этим объясняется то, что метод применяют для размерных цепей с числом звеньев не более четырех, а число групп деталей стремятся сделать возможно меньшим.

Для применения метода групповой взаимозаменяемости необходимо, чтобы выполнялись следующие условия.

1. Точность формы и расположения поверхностей деталей не должна превышать допуска их размера в группе. Очевидно, что если это условие не выполняется, то применение метода групповой взаимозаменяемости оказывается невозможным.

2. При распределении расширенного допуска замыкающего звена $T'A_\Delta$ между составляющими звеньями необходимо, чтобы сумма допусков увеличивающих звеньев была равна сумме допусков уменьшающих звеньев, т. е.

$$\sum_{i=1}^{n} T'\vec{A}_i = \sum_{i=1}^{p} T'\overleftarrow{A}_i.$$

Если это равенство не будет соблюдаться, то среднее значение замыкающего звена изделий, собранных из деталей разных соответственных групп, будет различным.

Покажем это на примере трехзвенной размерной цепи, к которой можно свести любую многозвенную цепь.

На рис. 3.20 показана размерная цепь А, определяющая зазор между валом и отверстием во втулке. Уравнение этой размерной цепи

$$A_\Delta = \vec{A}_1 - \overleftarrow{A}_2.$$

Допуск TA_Δ замыкающего звена увеличен в N раз.

Рис. 3.20. К достижению точности замыкающего звена методом групповой взаимозаменяемости

В соответствии с расширенным допуском замыкающего звена установлены производственные допуски $T'A_1$ и $T'A_2$ составляющих звеньев, причем $T'A_1 = T'A_2$.

Каждое из полей допусков $T'A_1$ и $T'A_2$ разделено на N интервалов, т. е. образовано N групп деталей.

При этом

$$T^I A_1 = T^{II} A_1 = ... = T^N A_1;$$

$$T^I A_2 = T^{II} A_2 = ... = T^N A_2;$$

$$T^I A_1 + T^I A_2 = T^{II} A_1 + T^{II} A_2 = ... = T^N A_1 + T^N A_2 = TA_\Delta.$$

Таким образом, соединение деталей, взятых из соответственных групп, обеспечит допуск TA_Δ точно так же, как и при методе полной взаимозаменяемости.

Координаты середины поля допуска замыкающего звена:

для первых интервалов $T^I A_1$ и $T^I A_2$

$$\Delta_0^I A_\Delta = \Delta_0^I A_1 - \Delta_0^I A_2;$$

для вторых интервалов $T^{II} A_1$ и $T^{II} A_2$

$$\Delta_0^{II} A_\Delta = \left(\Delta_0^I A_1 + T^I A_1\right) - \left(\Delta_0^I A_2 + T^I A_2\right).$$

Так как $T^I A_1 = T^I A_2$, то

$$\Delta_0^{II} A_\Delta = \Delta_0^I A_1 - \Delta_0^I A_2.$$

Таким образом, при равенстве расширенных допусков $T'A_1 = T'A_2$ координаты середины полей допусков замыкающего звена и его средние значения в разных группах деталей будут одинаковыми.

Этого не произойдет при $T'A_1 \neq T'A_2$ и соблюдении равенства $T'A_1 + T'A_2 = T'A_\Delta$.

Так, для вторых интервалов $T^{II}A_1$ и $T^{II}A_2$

$$\Delta_0^{II}A_\Delta = \left(\Delta_0^{I}A_1 + T^{I}A_1\right) - \left(\Delta_0^{I}A_2 + T^{I}A_2\right).$$

Так как $T^{I}A_1 \neq T^{I}A_2$, то

$$\Delta_0^{II}A_\Delta \neq \Delta_0^{I}A_\Delta,$$

т. е. координаты середин полей допусков замыкающего звена и его средние значения в разных группах деталей будут разными.

3. Важным требованием, в значительной степени определяющим экономичность метода групповой взаимозаменяемости, является требование идентичности распределений размеров в пределах полей допусков. Только при соблюдении этого условия будет обеспечиваться комплектность изделий (рис. 3.21, *а*), не будет избытка одних и нехватки других деталей в группе, т. е. ситуации, показанной на рис. 3.21, *б*. Полностью избежать этого трудно. Поэтому при использовании метода групповой взаимозаменяемости практически всегда имеется незавершенное производство.

Метод групповой взаимозаменяемости целесообразно использовать в крупносерийном и массовом производстве для соединений высокой точности. При изготовлении подшипников качения и сборке резьбовых соединений с натягом этот метод является единственным экономичным методом обеспечения точности.

Рис. 3.21. Влияние характера распределений размеров на собираемость изделий (стрелки направлены к соответственным группам деталей)

Рассмотрим применение метода групповой взаимозаменяемости для обеспечения точности замыкающего звена в примере, показанном на рис. 3.19.

Напомним, что в этом примере замыкающее звено $A_\Delta = 0^{+0,2}$ мм. Номинальные значения составляющих звеньев: $A_1 = 45$ мм; $A_2 = 50$ мм; $A_3 = 5$ мм. Уравнение размерной цепи

$$A_\Delta = \vec{A}_2 - \overleftarrow{A}_1 - \overleftarrow{A}_3 .$$

Допустим, что экономически целесообразным является расширение допуска замыкающего звена A_Δ в три раза, т. е. число групп деталей $N = 3$. Расширенный допуск замыкающего звена

$$T'A_\Delta = TA_\Delta \cdot N = 0,2 \cdot 3 = 0,6 \text{ мм.}$$

Сумма расширенных допусков увеличивающих звеньев должна быть равна сумме расширенных допусков уменьшающих, т. е.

$$T'A_2 = T'A_1 + T'A_3 = \frac{1}{2} T'A_\Delta .$$

Отсюда

$$T'A_2 = \frac{1}{2} T'A_\Delta = \frac{0,6}{2} = 0,3 \text{ мм;}$$

$$T'A_1 + T'A_3 = \frac{1}{2} T'A_\Delta = 0,3 \text{ мм.}$$

Учитывая сложность изготовления деталей, принимаем

$$T'A_1 = 0,24 \text{ мм и } T'A_3 = 0,06 \text{ мм.}$$

Соответственно групповые допуски составят:

$$TA_1 = \frac{T'A_1}{N} = \frac{0,24}{3} = 0,08 \text{ мм;}$$

$$TA_2 = \frac{T'A_2}{N} = \frac{0,3}{3} = 0,1 \text{ мм;}$$

$$TA_3 = \frac{T'A_3}{N} = \frac{0,06}{3} = 0,02 \text{ мм.}$$

Для *I* группы деталей (табл. 3.3) примем следующие координаты середин полей допусков размеров

$$\Delta_0 A_1 = -0,04 \text{ мм; } \Delta_0 A_2 = -0,05 \text{ мм.}$$

Координату середины поля допуска размера A_3 найдем из уравнения

$$\Delta_0 A_\Delta = \Delta_0 \vec{A}_2 - \Delta_0 \overleftarrow{A}_1 - \Delta_0 \overleftarrow{A}_3 ;$$

$$0,1 = 0,05 - (-0,04) - \Delta_0 A_3 .$$

Отсюда

$$\Delta_0 A_3 = -0{,}1 + 0{,}05 + 0{,}04 = -0{,}01 \text{ мм.}$$

Координаты середины полей допусков размеров каждой следующей группы (табл. 3.3) получаются увеличением этой координаты предшествующей группы на величину группового допуска, т. е. для звена A_1 – на 0,08 мм; для звена A_2 – на 0,1 мм; для звена A_3 – на 0,02 мм.

Таблица 3.3

Допуски и координаты середин полей допусков составляющих звеньев

Группа	TA_1	$\Delta_0 A_1$	TA_2	$\Delta_0 A_2$	TA_3	$\Delta_0 A_3$	TA_Δ	$\Delta_0 A_\Delta$
I	0,08	–0,04	0,1	+0,05	0,02	–0,01	0,2	0,1
II	0,08	+0,04	0,1	+0,15	0,02	+0,01	0,2	0,1
III	0,08	+0,12	0,1	+0,25	0,02	+0,03	0,2	0,1

Две последние колонки этой таблицы показывают, что при соединении деталей соответственных групп требуемое значение замыкающего звена будет обеспечено.

Номинальные значения и предельные отклонения составляющих звеньев в группах деталей приведены в табл. 3.4.

Таблица 3.4

Номинальные значения и предельные отклонения составляющих звеньев

Группа	A_1	A_2	A_3
I	$45_{-0{,}08}$	$50^{+0{,}1}$	$5_{-0{,}02}$
II	$45^{+0{,}08}$	$50^{+0{,}2}_{+0{,}1}$	$5^{+0{,}02}$
III	$45^{+0{,}16}_{+0{,}08}$	$50^{+0{,}3}_{+0{,}2}$	$5^{+0{,}04}_{+0{,}02}$

3.2.3.4. Метод пригонки

Суть метода заключается в том, что требуемая точность замыкающего звена размерной цепи достигается изменением размера так называемого компенсирующего звена (одного из составляющих звеньев) путем снятия с него определенного слоя материала. На схеме размерной цепи обозначение компенсирующего звена, часто называемого просто компенсатором, заключается в прямоугольную рамку, например $\boxed{A_1}$.

При обеспечении точности замыкающего звена методом пригонки на все составляющие звенья устанавливают экономичные в данных производственных условиях допуски, а также задают координаты середин полей допусков:

$$T'A_1,\ T'A_2,\ \ldots\ T'A_{n+p};$$

$$\Delta'_0 A_1,\ \Delta'_0 A_2,\ \ldots\ \Delta'_0 A_{n+p}.$$

При этом допуск замыкающего звена $T'A_\Delta$ может превышать требуемый TA_Δ, т. е.

$$T'A_\Delta = \sum_{i=1}^{n+p} T'A_i > TA_\Delta.$$

Разность этих допусков называют наибольшей расчетной компенсацией

$$\delta_к = T'A_\Delta - TA_\Delta.$$

Она должна удаляться из размерной цепи путем снятия припуска с компенсирующего звена.

Последовательность и содержание пригоночных работ покажем на примере (см. рис. 3.19), полагая, что в качестве компенсирующего звена взято проставочное кольцо толщиной $\boxed{A_3}$. Сперва производится предварительная сборка изделия (без установки проставочного кольца) и измеряется расстояние между торцом зубчатого колеса и стенкой корпуса. Размер компенсирующего звена $\boxed{A_3}$ обычно определяют как разность этого расстояния и средней величины требуемого зазора A_Δ. Далее изделие разбирают. Затем путем снятия с проставочного кольца припуска получают его требуемый размер и производят окончательную сборку изделия.

Основным достоинством пригонки является возможность достижения высокой точности замыкающего звена при относительно невысокой точности деталей.

Недостатками пригонки является необходимость использования рабочих высокой квалификации и значительные колебания затрат времени при ее выполнении из-за колебаний удаляемых припусков. Последнее затрудняет применение поточных методов производства.

Экономичной областью использования метода пригонки считается единичное и мелкосерийное производство.

3.2.3.5. Метод регулирования

Сущность метода регулирования заключается в том, что требуемая точность замыкающего звена размерной цепи достигается изменением размера компенсирующего звена без удаления материала с компенсатора.

Принципиально метод регулирования аналогичен методу пригонки. Различие между ними состоит в способе изменения размера компенсирующего звена. При методе регулирования это изменение может быть выполнено двумя путями: изменением положения компенсирующего звена или введением в изделие специальной детали, имеющей требуемый размер. В первом случае компенсатор называют подвижным, во втором – неподвижным.

Примером подвижного компенсатора является втулка в механизме (рис. 3.22), перемещая которую в осевом направлении можно регулировать зазор A_Δ между ее торцом и торцом зубчатого колеса. После установления требуемого зазора положение втулки фиксируют относительно корпуса стопорным винтом.

Рис. 3.22. Обеспечение точности зазора A_Δ методом регулирования с применением подвижного компенсатора

В качестве неподвижных компенсаторов используют проставочные кольца, прокладки и другие детали простой конструкции. Группы неподвижных компенсаторов разных размеров должны быть изготовлены заранее.

Метод регулирования обладает следующими достоинствами.

1. Возможно достижение любой степени точности замыкающего звена при достаточно широких допусках составляющих звеньев.

2. Затраты времени на выполнение регулировочных работ невелики.

3. Не создается заметных трудностей при нормировании и организации сборочных работ.

4. Обеспечивается возможность поддержания требуемой точности замыкающего звена в процессе эксплуатации изделий, которая снижается из-за изнашивания деталей.

На практике задачи обеспечения требуемой точности замыкающих звеньев часто приходится решать для связанных размерных цепей. В этом случае решение прямой задачи начинают с размерной цепи с наименьшим допуском замыкающего звена. Затем переходят к размерной цепи со следующим по величине допуском замыкающего звена и т. д. При этом для каждой отдельной размерной цепи может быть избран тот или иной метод достижения точности замыкающего звена. Решение обратной задачи может выполняться в любой последовательности отдельных размерных цепей.

Выше методы обеспечения точности замыкающих звеньев были рассмотрены применительно к размерным цепям, звенья которых представляют собой линейные размеры. Для размерных цепей с угловыми размерами, заданными в градусной мере, имеющих общие вершины углов

(см. рис. 3.12, *в* и 3.12, *г*), методики расчетов и расчетные зависимости остаются такими же, как для размерных цепей с линейными размерами.

3.2.4. Размерный анализ спроектированных технологических процессов изготовления деталей

Как отмечалось выше, замыкающими звеньями в технологических размерных цепях второго вида, называемых в дальнейшем просто технологическими размерными цепями, являются конструкторские размеры детали и размеры припусков на обработку. Составляющими звеньями в этих цепях являются технологические размеры заготовки. К ним относятся размеры исходной заготовки, размеры, получаемые на всех операциях (переходах) обработки заготовки резанием, размеры термоупрочненных слоев, т. е. все размеры, которые указываются в технологической документации, регламентирующей изготовление деталей.

На рис. 3.23 приведена схема подрезки торца заготовки на токарном станке и простейшая технологическая размерная цепь, составляющими звеньями которой являются размеры заготовки A_1 и A_2, получаемые соответственно на предшествующей и выполняемой операциях. Так как именно размеры A_1 и A_2 предписываются к обязательному выполнению, то припуск Z является замыкающим звеном в этой технологической размерной цепи (он получается последним как результат выполнения указанных размеров).

Рис. 3.23. Схема подрезки торца заготовки на токарном станке и технологическая размерная цепь с замыкающим звеном – припуском

В то же время в ряде случаев припуск может быть в технологической размерной цепи и звеном составляющим, т. е. быть своеобразным технологическим размером. На рис. 3.24 дана схема подрезки торца прутка на токарно-револьверном станке. Пруток после обработки очередной заготовки подается вправо до контакта с упором, относительно которого на

расстоянии, равном припуску Z, установлен подрезной резец. Таким образом, именно припуск (технологический размер А) будет выдерживаться при подрезке торца заготовки.

Рис. 3.24. Схема подрезки торца прутка на токарно-револьверном станке

Если конструкторский размер оказывается замыкающим звеном в технологической размерной цепи (см. рис. 3.15, *б*), то принято говорить, что он непосредственно не выдерживается при изготовлении детали. В большинстве случаев этого можно избежать, но, как правило, за счет усложнения технологического процесса. Поэтому технологические процессы изготовления деталей часто строятся так, что некоторые конструкторские размеры, обычно имеющие невысокую точность, непосредственно не выдерживаются.

Вместе с тем существуют отдельные конструкторские размеры, которые физически невозможно непосредственно выдержать при изготовлении деталей. Примером такого конструкторского размера является толщина цементированного слоя, формируемого у детали при химико-термической обработке и последующем шлифовании.

Отметим, что диаметральные конструкторские размеры при изготовлении деталей за редким исключением выдерживаются непосредственно.

Наряду с припусками на обработку необходимо различать так называемые напуски. Это «лишние» объемы материала, которые приходится удалять из-за упрощения формы исходной заготовки по отношению к форме детали. Понятие «напуск» иллюстрирует рис. 3.25, на котором припуски показаны обычной штриховкой, а напуски – штриховкой «в клетку» (исходная заготовка – круглый прокат). В отличие от припусков напуски не являются звеньями технологических размерных цепей и при размерном анализе технологических процессов их не учитывают.

Суть размерного анализа спроектированного технологического процесса состоит в решении обратных задач для технологических размерных цепей.

Рис. 3.25. К понятию «напуск»

Размерный анализ позволяет оценить качество технологического процесса, в частности, определить, будет ли он обеспечивать выполнение конструкторских размеров, непосредственно не выдерживаемых при обработке заготовки, найти предельные значения припусков на обработку и оценить их достаточность для обеспечения требуемого качества поверхностного слоя обрабатываемых поверхностей и (или) возможность удаления припусков без перегрузки режущего инструмента.

Исходными данными для размерного анализа являются чертеж детали, чертеж исходной заготовки и технологический процесс изготовления детали.

Методику размерного анализа спроектированного технологического процесса удобнее всего рассмотреть на конкретном примере. В качестве такого примера возьмем технологический процесс изготовления пуансона (рис. 3.26). Размерный анализ выполним только в продольном направлении; размерный анализ в диаметральном направлении может быть выполнен аналогично.

Рис. 3.26. Эскиз детали

Рис. 3.27. Эскиз исходной заготовки

После изучения исходных данных вычерчиваются упрощенные эскизы детали, исходной заготовки и операционные эскизы обработки заготовки. На эскизах детали и исходной заготовки указываются только размеры в продольном направлении (рис. 3.26 и 3.27). Эскизы обработки выполняются только для тех операций технологического процесса и выписываются только те технологические переходы, на которых происходит формирование продольных размеров (табл. 3.5). Изменения размеров заготовки при термообработке считаются пренебрежимо малыми. На эскизах обработки указываются технологические базы, обрабатываемые поверхности (утолщенными линиями) и все технологические размеры в рассматриваемом направлении.

Таблица 3.5

Технологический процесс изготовления пуансона

Операция	Эскиз	Переходы
1 Токарно-револьверная		1. Подрезать торец, выдержав размер $57_{-0,74}$. 2. Точить фаску
2 Токарно-револьверная		1. Подрезать торец, выдержав размер $55,2_{-0,3}$. 2. Подрезать торец, выдержав размер $30 \pm 0,1$. 3. Точить фаску
3 Термическая		1. Закалить. 2. Отпустить
4 Круглошлифовальная		1. Шлифовать торец, сняв припуск $0,2 \pm 0,05$
5 Плоскошлифовальная		1. Шлифовать торец, выдержав размер $30 \pm 0,026$

Анализируемые операции и переходы нумеруются в последовательности выполнения цифрами 1, 2, 3 и т. д. Дополнительно указываются номера операций по технологическому процессу.

Технологические размеры обозначаются буквой А с индексами номеров операций и переходов. Например, размер $A_{1.2}$ – выполняется во 2-м переходе 1-й операции. Для размеров исходной заготовки первый индекс принимается равным 0 (нулю), а второй – равным 1, 2, 3 и т. д.

Конструкторские размеры обозначаются буквой К с индексами 1, 2, 3 и т. д.

Припуски обозначаются буквой Z с такими же индексами, как у технологических размеров, при получении которых они удаляются.

Для проведения размерного анализа строится размерная схема технологического процесса. Для ее построения на эскизе детали, выполненном в произвольном масштабе, изображаются припуски на обработку, как это показано на рис. 3.28. Причем сначала изображаются припуски, удаляемые на последней операции, затем – на предпоследней и т. д.

На полученном эскизе проставляются:

- технологические размеры в порядке их получения, начиная с размеров исходной заготовки и заканчивая размерами, выдерживаемыми на последней операции;
- размеры припусков на обработку (изображаются волнистыми линиями);
- конструкторские размеры.

Таким образом, получаем размерную схему технологического процесса (рис. 3.28). Правильность построения размерной схемы проверяется так:

- число технологических размеров должно быть на единицу меньше числа поверхностей;
- число конструкторских размеров и размеров припусков должно быть равно числу технологических размеров.

В рассматриваемом примере число поверхностей – 10, число технологических размеров – 9, число конструкторских размеров – 4, число припусков – 5. Следовательно, размерная схема построена правильно.

Здесь следует иметь в виду, что если при выполнении какого-либо перехода выдерживается величина припуска, то он является одновременно и технологическим размером. В данном примере припуск $Z_{4.1}$ является технологическим размером $A_{4.1}$. Этот припуск необходимо включать как в число припусков, так и в число технологических размеров.

Рис. 3.28. Размерная схема технологического процесса

По размерной схеме технологического процесса находятся технологические размерные цепи. Например, припуск $Z_{1.1}$ является замыкающим звеном в размерной цепи, составляющими звеньями которой являются технологические размеры $A_{0.1}$ и $A_{1.1}$, а конструкторский размер K_4 является замыкающим звеном в размерной цепи с составляющими звеньями $A_{2.3}$ и $A_{4.1}$.

Однако выявление по размерной схеме технологических размерных цепей с большим числом составляющих звеньев оказывается затруднительным. Для облегчения решения этой задачи целесообразно, особенно при отсутствии опыта, построить граф технологических размерных цепей.

Сначала строится граф-дерево технологических размеров (рис. 3.29). На нем поверхности изображаются кружками (вершины графа), а технологические размеры – прямыми линиями (ребра графа), которые соединяют соответствующие вершины. Построение граф-дерева начинается с вершины-корня. За вершину-корень следует принимать поверхность, которая является технологической базой на первой операции или от которой задан первый технологический размер.

Рис. 3.29. Граф-дерево технологических размеров

В рассматриваемом примере за вершину-корень взята поверхность *10* (см. рис. 3.28 и 3.29). От вершины-корня *10* проводятся ребра $A_{0.1}$, $A_{0.2}$ и $A_{1.1}$, в конце которых размещаются соответственно вершины *1*, *7* и *2*. От вершины *2* проводятся ребра $A_{1.2}$ и $A_{2.1}$, на концах которых размещаются соответственно вершины *3*, *9* и т. д. В итоге на графе-дереве должны быть показаны все имеющиеся на размерной схеме поверхности (вершины) и соединяющие их технологические размеры (ребра). Если этот граф построен правильно, то на нем не должно быть разрывов и замкнутых циклов (контуров).

Затем на граф-дерево технологических размеров в виде ребер, соединяющих соответствующие вершины, наносятся конструкторские размеры (утолщенными дугами) и припуски (волнистыми линиями). Таким образом получаем граф технологических размерных цепей (рис. 3.30). На этом графе технологические размерные цепи представляют собой кратчайшие размерные контуры, состоящие из припуска или конструкторского размера и технологических размеров. Так, например: припуск $Z_{2.2}$ –

замыкающее звено в размерной цепи с составляющими звеньями $A_{0.2}$, $A_{1.1}$, $A_{2.1}$ и $A_{2.2}$; конструкторский размер K_1 – замыкающее звено в размерной цепи с составляющими звеньями $A_{5.1}$, $A_{4.1}$, $A_{2.2}$ и $A_{2.1}$; конструкторский размер K_3 совпадает с технологическим размером $A_{1.2}$, т. е. выдерживается непосредственно.

Рис. 3.30. Граф технологических размерных цепей

Для определения увеличивающих и уменьшающих звеньев по графу (рис. 3.30) поступают следующим образом. Мысленно начинают обход размерного контура по замыкающему звену от вершины с бóльшим номером к вершине с меньшим номером. Если в направлении обхода составляющее звено соединяет вершину с меньшим номером с вершиной с бóльшим номером, то оно увеличивающее, если наоборот – то уменьшающее. Например, обход размерного контура $Z_{2.2}$, $A_{0.2}$, $A_{1.1}$, $A_{2.1}$, $A_{2.2}$ (см. рис. 3.30) начинаем от вершины *7* к вершине *6*. Уравнение размерной цепи будет

$$Z_{2.2} = A_{22} - A_{21} + A_{11} - A_{02} = A_{22} + A_{11} - A_{21} - A_{02}.$$

Технологические размерные цепи и результаты вычисления их замыкающих звеньев (припусков и конструкторских размеров) для рассматриваемого примера приведены в табл. 3.6. Результаты расчетов, выполненных методом максимума-минимума, показывают следующее.

Таблица 3.6

Схемы технологических размерных цепей и значения их замыкающих звеньев

Проверяемые размеры	Схемы размерных цепей	Уравнения размерных цепей и вычисление значений замыкающих звеньев
$K_1 = 55_{-0,74}$	$\vec{A}_{2.1}$; $\overleftarrow{A}_{4.1}$; $\overleftarrow{A}_{2.2}$; $\vec{A}_{5.1}$; K_1	$K_1 = A_{2.1} + A_{5.1} - A_{2.2} - A_{4.1}$; $K_1 = 55{,}2_{-0,3} + 30 \pm 0{,}026 - 30 \pm 0{,}1 - 0{,}2 \pm 0{,}05 = 55^{+0,176}_{-0,476}$
$K_2 = 30 \pm 0{,}026$	K_2; $\vec{A}_{5.1}$	$K_2 = A_{5.1} = 30 \pm 0{,}026$
$K_3 = 1 \pm 0{,}3$	K_3; $\vec{A}_{1.2}$	$K_3 = A_{1.2} = 1 \pm 0{,}3$
$K_4 = 1 \pm 0{,}3$	$\vec{A}_{2.3}$; K_4; $\overleftarrow{A}_{4.1}$	$K_4 = A_{2.3} - A_{4.1}$; $K_4 = 1{,}2 \pm 0{,}2 - 0{,}2 \pm 0{,}05 = 1 \pm 0{,}25$
$Z_{1.1}$	$\vec{A}_{0.1}$; $Z_{1.1}$; $\overleftarrow{A}_{1.1}$	$Z_{1.1} = A_{0.1} - A_{1.1}$; $Z_{1.1} = 59^{+1,0}_{-0,5} - 57_{-0,74} = 2^{+1,74}_{-0,5}$
$Z_{2.1}$	$\vec{A}_{1.1}$; $\overleftarrow{A}_{2.1}$; $Z_{2.1}$	$Z_{2.1} = A_{1.1} - A_{2.1}$; $Z_{2.1} = 57_{-0,74} - 55{,}2_{-0,3} = 1{,}8^{+0,3}_{-0,74}$

Окончание табл. 3.6

Проверяемые размеры	Схемы размерных цепей	Уравнения размерных цепей и вычисление значений замыкающих звеньев
$Z_{2.2}$	$\vec{A}_{1.1}$; $\overleftarrow{A}_{2.1}$; $\vec{A}_{2.2}$; $Z_{2.2}$; $\overleftarrow{A}_{0.2}$	$Z_{2.2} = A_{1.1} + A_{2.2} - A_{0.2} - A_{2.1}$; $Z_{2.2} = 57_{-0,7,} + 30 \pm 0,1 - -30^{+1,0}_{-0,5} - 55,2_{-0,3} = 1,8^{+0,9}_{-1,84}$
$Z_{5.1}$	$\vec{A}_{4.1}$; $\vec{A}_{2.2}$; $\overleftarrow{A}_{5.1}$; $Z_{5.1}$	$Z_{5.1} = A_{2.2} + A_{4.1} - A_{5.1}$; $Z_{5.1} = 30 \pm 0,1 + 0,2 \pm 0,05 - - 30 \pm 0,026 = 0,2 \pm 0,176$

Технологический процесс изготовления пуансона не обеспечивает получение конструкторского размера $К_1$, являющегося замыкающим звеном в размерной цепи с составляющими звеньями $A_{2.1}$, $A_{5.1}$, $A_{2.2}$ и $A_{4.1}$. Вместе с тем расчетная погрешность $К_1$ (0,652 мм) меньше его допуска (0,74 мм). Поэтому для обеспечения заданных по чертежу предельных отклонений размера $К_1$ необходимо лишь откорректировать номинальные значения соответствующих технологических размеров. Конструкторские размеры $К_2$ и $К_3$ выдерживаются при изготовлении пуансона непосредственно, совпадая соответственно с технологическими размерами $A_{5.1}$ и $A_{1.2}$. Конструкторский размер $К_4$, являясь замыкающим звеном в размерной цепи с составляющими звеньями $A_{2.3}$ и $A_{4.1}$, получается в соответствии с требованием чертежа.

Обратимся теперь к анализу расчетных значений припусков на обработку. Минимальные значения припусков $Z_{1.1}$ и $Z_{2.1}$ достаточны для обеспечения требуемого качества поверхностных слоев; колебание значений этих припусков невелико, что обеспечит достаточно стабильные условия обработки. Минимальное значение припуска $Z_{2.2}$ является отрицательным, что может привести к браку по качеству поверхностного слоя (на части заготовок будет сохраняться чернота). Минимальное значение припуска $Z_{5.1}$ составляет всего 0,024 мм, что может оказаться недостаточным для удаления дефектного слоя.

Таким образом, рассмотренный технологический процесс в целом должен быть признан неудовлетворительным, требующим соответствующей корректировки.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое базирование и закрепление?
2. Что такое база, комплект баз, опорная точка?
3. В чем состоит правило шести точек?
4. Как классифицируются базы по числу отнимаемых степеней свободы?
5. Как классифицируются базы по характеру проявления?
6. Что такое основная и вспомогательная базы изделия?
7. Что такое размерная цепь?
8. Перечислите виды звеньев размерных цепей.
9. Как классифицируются размерные цепи?
10. В чем заключаются прямая и обратная задачи при расчете размерных цепей?
11. Как распределяется допуск замыкающего звена между допусками составляющих звеньев (при решении прямой задачи)?
12. В чем состоит отличие решения прямой задачи методом максимума-минимума от ее решения вероятностным методом?
13. Как рассчитываются плоские размерные цепи с непараллельными звеньями?
14. Каковы особенности расчета размерных цепей с параллельно-связанными звеньями?
15. В чем состоит сущность обеспечения точности замыкающего звена методом полной взаимозаменяемости?
16. В чем состоит сущность обеспечения точности замыкающего звена методом неполной взаимозаменяемости?
17. В чем состоит сущность обеспечения точности замыкающего звена методом групповой взаимозаменяемости?
18. В чем состоит сущность обеспечения точности замыкающего звена методом регулирования?
19. В чем состоит сущность обеспечения точности замыкающего звена методом пригонки?
20. Какие звенья являются замыкающими в технологических размерных цепях, формирующихся при изготовлении деталей?
21. Как строится размерная схема технологического процесса изготовления детали?
22. В чем состоит сущность размерного анализа спроектированного технологического процесса изготовления детали?

4. ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛА И ТОЧНОСТИ ДЕТАЛИ

Для получения качественной детали в технологическом процессе ее изготовления необходимо предусмотреть решение двух важнейших задач:

- обеспечение требуемых свойств материала детали;
- необходимой точности размеров, формы и расположения поверхностей детали.

Эти задачи являются взаимосвязанными, однако сначала целесообразно рассмотреть каждую из них в отдельности.

4.1. Технологическое обеспечение свойств материала детали

4.1.1. Общие представления о формировании свойств материала детали при ее изготовлении

Детали машин изготавливают из сталей, чугунов, цветных металлов и сплавов, полимеров, гранита и других материалов. Материал детали выбирает конструктор, исходя из ее функционального назначения. Выбор материала производится также с учетом его технологических свойств.

К механическим свойствам материала относят предел прочности, предел текучести, твердость, модуль продольной упругости, ударную вязкость, предел выносливости, относительное удлинение и др.

К физическим свойствам относят удельный вес, температуру плавления и кристаллизации, теплопроводность, коэффициент линейного расширения, электрическое сопротивление и др.

Химические свойства материала прежде всего характеризуются его коррозионной стойкостью.

К технологическим свойствам материала относят его литейные свойства, обрабатываемость давлением и резанием, свариваемость и т. д.

При изготовлении детали материал заготовки подвергается силовым, тепловым, химическим и другим видам воздействий. В результате этого на каждом из этапов технологического процесса могут изменяться химический состав, структура, зернистость материала заготовки и, следовательно, его свойства. Формирование свойств материала детали может быть представлено схемой, приведенной на рис. 4.1.

Рассмотрим, как формируются свойства материала детали на основных этапах ее изготовления.

Формирование свойств материала исходных заготовок. В большинстве случаев в качестве исходных заготовок используют прокат, отливки и поковки, получаемые ковкой или штамповкой.

Рис. 4.1. Схема формирования свойств материала детали при ее изготовлении

Структура и размер зерен материала отливки, от которых зависят его механические свойства, определяются большим числом факторов: количеством и видом примесей и легирующих элементов в сплаве, температурой разливки, скоростью охлаждения при кристаллизации, температуры, теплопроводности, состояния внутренних поверхностей литейной формы.

Вредными примесями, ухудшающими механические и физические свойства материала отливок, являются сера и фосфор. Фосфор снижает пластичность, вызывает хладноломкость стали, способствует образованию ликваций. Сера способствует образованию горячих трещин, возникающих при кристаллизации. Повышенное содержание серы в стали тем опаснее, чем сложнее форма отливки и чем большее сопротивление оказывает литейная форма усадке металла.

Получению мелкозернистой структуры, повышению механических свойств стальных отливок благоприятствует легирование стали никелем, хромом, молибденом, ванадием.

Увеличение скорости охлаждения при кристаллизации металла ведет к получению более мелкозернистой структуры. Вследствие этого, например, литье в кокили по сравнению с литьем в песчаные формы обеспечивает более высокие механические свойства материала отливки. В то же время необходимо иметь в виду, что при быстром охлаждении в поверхностных слоях и тонкостенных частях чугунных отливок может происходить отбел, т. е. образование белого чугуна, в котором весь углерод находится в связанном состоянии в виде цементита. Белый чугун имеет высокую твердость (НВ 4500…5500 МПа); его обработка резанием лезвийными инструментами является крайне затруднительной.

Свойства материала отливки в значительной степени зависят от ее конструкции, которая должна создавать возможность одновременного или последовательного затвердевания частей отливки. Для одновремен-

ного затвердевания желательна равномерность сечений стенок отливки, а для последовательного – постепенное увеличение сечений стенок в направлении затвердевания металла. Неравномерное охлаждение различных частей отливки, сопротивление литейной формы усадке металла могут привести к образованию трещин, усадочных раковин и остаточных напряжений.

При получении исходных заготовок холодной обработкой давлением их материал упрочняется (наклепывается). При этом наряду с повышением характеристик прочности материала происходит снижение характеристик его пластичности. Из-за неравномерности пластических деформаций на различных участках заготовок в них возникают остаточные напряжения.

При изготовлении исходных заготовок горячей обработкой давлением большое значение имеет температура нагрева металла. Нарушение температурного режима может привести к образованию трещин в заготовке, дефектной крупнозернистой структуре (перегрев стали) и неисправимому браку в виде пережога (оплавления и окисления металла по границам зерен, приводящих к полной потере пластичности). Заготовка перед горячей обработкой давлением должна быть нагрета равномерно по всему объему. В противном случае в ней возникают термические напряжения, которые могут привести к появлению трещин. При высокой температуре происходит окисление металла. В результате этого на поверхности стальной заготовки образуется окалина и обезуглероженный слой, толщина которого иногда достигает 1,5…2,0 мм. Для уменьшения окисления заготовки нагревают в нейтральной или восстановительной атмосфере.

В целом материал исходных заготовок, полученных обработкой давлением, по сравнению с материалом отливок, полученных традиционными способами, имеет более мелкозернистую структуру и более высокие механические свойства. Вместе с тем при использовании специальных способов литья, например литья с направленной кристаллизацией, может быть обеспечен очень высокий уровень механических свойств материалов.

Формирование свойств материала при термической и химико-термической обработках. Основной целью термической обработки является изменение структуры материала, направленное на формирование требуемых его свойств. Так как наиболее распространенными материалами в машиностроении являются стали, то суть различных видов и способов термообработки рассмотрим применительно к стальным заготовкам.

Основными видами термообработки стальных заготовок являются отжиг, нормализация, закалка и отпуск.

Отжиг заготовок из стали выполняют для снижения твердости, повышения пластичности, получения однородной мелкозернистой структуры, устранения остаточных напряжений. При отжиге заготовка нагрева-

ется на 30…50 °С выше точки A_{c3}, выдерживается при этой температуре до полного завершения структурно-фазовых превращений и медленно охлаждается. В результате отжига в отливках устраняется грубозернистая структура, снижающая механические свойства стали. В заготовках, полученных ковкой и штамповкой, устраняются последствия различия условий деформирования их отдельных частей, структура стали приобретает однородность.

Нормализация отличается от отжига условиями охлаждения. После нагрева до температуры на 50…70 °С выше точки A_{c3} заготовку охлаждают на воздухе. Нормализация обеспечивает более высокую прочность, чем отжиг, из-за большей скорости охлаждения.

Закалку стальных заготовок производят для получения структур высокой твердости. При закалке (полной) заготовку нагревают выше точки A_{c3}, выдерживают при этой температуре определенное время, а затем быстро охлаждают путем погружения заготовки в воду или масло, имеющих температуру 20…25 °С. При закалке вследствие неравномерного нагрева и охлаждения, изменения объемов при фазовых превращениях возникают значительные остаточные напряжения и деформации (коробление) заготовок; при определенных условиях в них могут возникать закалочные трещины. Для подавления этих негативных явлений закалку выполняют в двух средах или используют ступенчатую закалку. Заготовки из легированных сталей, для которых температура конца мартенситного превращения ниже 20…25 °С, сразу после закалки подвергают обработке холодом. Температура охлаждения составляет от –40 до –196 °С.

При закалке невозможно добиться одинаковой скорости охлаждения поверхности и сердцевины заготовок. Скорость охлаждения на некотором расстоянии от поверхности заготовки оказывается недостаточной для закалки, поэтому сталь способна закаливаться лишь на определенную глубину. Эту способность стали называют прокаливаемостью. Ее можно повысить путем увеличения содержания углерода и введения в состав стали легирующих элементов, например хрома.

В целом ряде случаев целесообразно закаливать лишь поверхностный слой заготовки, оставляя незакаленной ее сердцевину. Для этого нагревают до закалочной температуры только этот слой и быстро охлаждают его. Нагрев осуществляют газопламенным способом, токами высокой частоты, низкотемпературной плазмой, лазером.

Отпуск выполняют после закалки при температурах ниже A_{c1}. Во время отпуска происходят структурно-фазовые превращения в закаленной стали, обеспечивающие повышение ее пластичности и снижение остаточных напряжений. В зависимости от температуры нагрева различают

три вида отпуска: низкий (120…250 °С), средний (350…450 °С) и высокий (500…650 °С). При низком отпуске выдержка составляет 0,5…2 ч; при температуре 100…120 °С она может доходить и до 10…15 ч. Такой режим отпуска применяют, когда нежелательно падение твердости стали, полученной при закалке. Выдержка при среднем и высоком отпуске обычно составляет от 1 до 2 ч для заготовок небольшой массы и от 3 до 8 ч – для заготовок массой от 200 до 1000 кг.

Комплексную термообработку заготовок из конструкционных сталей, состоящую из закалки и высокого отпуска, называют *улучшением*.

Для поверхностного упрочнения стальных заготовок и придания деталям коррозионной стойкости применяют химико-термическую обработку. Наиболее распространенными ее видами является цементация, азотирование и нитроцементация.

Цементация представляет собой диффузионное насыщение поверхностного слоя заготовок из низкоуглеродистой стали углеродом. Последующая закалка и низкий отпуск обеспечивают высокую твердость поверхностного слоя и высокую пластичность сердцевины заготовки, а также вызывает формирование в поверхностном слое остаточных напряжений сжатия. Это позволяет повысить износостойкость детали и ее усталостную прочность (предел выносливости). Твердость поверхностного слоя после закалки и отпуска может составлять $HRC_э$ 64…66. Толщина цементированного слоя обычно находится в пределах 0,5…2,2 мм, хотя может достигать (на крупных заготовках) 6 мм.

Цементацию осуществляют в твердом или газовом карбюризаторе при температуре 920…1050 °С. Длительность выдержки может составлять от 2 до 24 ч.

Во многих случаях цементации подвергают не все, а только отдельные поверхности заготовок, которые должны иметь высокую твердость. Для защиты нецементируемых поверхностей применяют меднение, нанесение специальных обмазок, в отверстия заготовки устанавливают медные пробки, а на наружные поверхности надевают колпачки.

Азотирование – это диффузионное насыщение поверхностного слоя заготовки азотом. Азотированию обычно подвергают заготовки из легированных сталей. До азотирования выполняют чистовую обработку заготовок и подвергают их закалке и высокому отпуску. После азотирования проводят отделочную обработку заготовок (тонким шлифованием, притиркой и т. п.). Азотирование применяют для повышения износостойкости деталей и усталостной прочности, а также их коррозионной стойкости. Твердость поверхностного слоя после азотирования достигает $HRC_э$ 70…72. Толщина азотированного слоя обычно составляет не более 0,5 мм. В этом слое возникают остаточные напряжения сжатия.

Азотирование осуществляют в атмосфере диссоциированного аммиака при температуре 500…600 °С. Процесс азотирования протекает довольно медленно. Так, при температуре 500…520 °С для получения азотированного слоя толщиной 0,1 и 0,8 мм требуется соответственно 3 и 90 ч.

Нитроцементация – это одновременное диффузионное насыщение поверхностного слоя заготовок азотом и углеродом. Такой процесс имеет определенные преимущества. Азот, способствуя диффузии углерода, дает возможность снизить температуру насыщения углеродом до 820…850 °С. Нитроцементации подвергают заготовки из легированных сталей. По своим свойствам нитроцементированный слой занимает промежуточное положение между цементированным и азотированным слоями. Он хорошо сопротивляется изнашиванию и коррозии.

Производится нитроцементация в газовой и иногда в жидкой среде. Газовая нитроцементация осуществляется в смеси науглероживающего газа (светильный газ, метан) и аммиака. Различают две разновидности этого процесса – высокотемпературный и низкотемпературный. В первом случае нитроцементация идет при температуре 820…850 °С, а во втором – при 530…570 °С. После высокотемпературной нитроцементации необходимо проводить закалку и низкотемпературный отпуск заготовки. Твердость поверхностного слоя после этого составляет $HRC_э$ 63…64. Низкотемпературную нитроцементацию выполняют после закалки и отпуска заготовок. Твердость поверхностного слоя после этого вида нитроцементации $HRC_э$ 67…68. Толщина нитроцементированного слоя обычно не превышает 0,8 мм.

О влиянии обработки резанием и других видов размерной обработки на свойства материала детали. При изготовлении деталей в настоящее время преобладает обработка резанием лезвийными и абразивными инструментами. При этом все более широкое применение получают электроэрозионная, электрохимическая, ультразвуковая, электронно-лучевая, лазерная и другие обработки. Каждый из методов обработки оказывает то или иное влияние на свойства материала заготовки и готовой детали. Так, при обработке резанием поверхностный слой заготовки претерпевает значительные пластические деформации и упрочняется (наклепывается). При электроэрозионной обработке, при которой удаление металла с заготовки происходит за счет его плавления и испарения, в поверхностном слое изменяется структура и химический состав. При электрохимической обработке, основанной на анодном растворении металла заготовки, возможно его растравливание по границам зерен и наводороживание поверхностного слоя. Каждый из методов обработки, за исключением электрохимической обработки при оптимальных условиях, вызывает формирование в поверхностном слое остаточных напряжений.

При чистовой размерной обработке толщина поверхностного слоя с измененными свойствами обычно невелика и составляет около 0,005…0,3 мм. Ввиду того, что именно поверхностный слой испытывает наибольшие нагрузки при работе деталей, влияние свойств его материала на их эксплуатационные свойства оказывается очень существенным, а порой – решающим.

Состояние поверхностного слоя деталей (заготовок) принято характеризовать термином «качество поверхностного слоя», под которым понимается не только совокупность свойств его материала, но и микрогеометрия обработанной поверхности.

Учитывая изложенное, влияние качества поверхностного слоя на эксплуатационные свойства деталей и их сопряжений, а также технологическое обеспечение требуемого качества поверхностного слоя рассмотрим более подробно.

4.1.2. Качество поверхностного слоя и его влияние на эксплуатационные свойства деталей

4.1.2.1. Основные показатели качества поверхностного слоя

Такими показателями являются: шероховатость поверхности, ее волнистость, наклеп и остаточные напряжения. В качестве дополнительных показателей качества поверхностного слоя используют: субшероховатость, химический состав материала, его структуру, зернистость, плотность дислокаций и др.

Под *шероховатостью 1* поверхности (рис. 4.2) понимают совокупность неровностей высотой примерно 0,01…1000 мкм с шагом меньшим, чем базовая длина l, используемая для ее измерения.

Рис. 4.2. Шероховатость (1) и волнистость (2)

Волнистость 2 поверхности – совокупность неровностей высотой примерно 0,01…1000 мкм с шагом большим, чем базовая длина, используемая для измерения шероховатости.

Шероховатость (рис. 4.3) характеризуют следующие параметры (ГОСТ 2789-73):

- среднее арифметическое отклонение профиля, мкм

$$Ra = \frac{1}{l}\int_0^l |y_i|\,dx, \text{ или } Ra \approx \frac{\sum_{i=1}^{N}|y_i|}{N},$$

где l – базовая длина, мм; y_i – текущая величина ординаты профиля шероховатости (расстояние от точки профиля до средней линии), мкм; dx – дифференциал абсциссы профиля; N – число рассматриваемых ординат профиля шероховатости;

Рис. 4.3. Профилограмма шероховатости поверхности

- высота неровностей профиля по десяти точкам, мкм

$$Rz = \frac{\sum_{i=1}^{5} h_i + \sum_{i=1}^{5} h_i'}{5},$$

где h_i – высота i-го наибольшего выступа профиля; h_i' – глубина i-й наибольшей впадины профиля;

- наибольшая высота профиля $R_{\max}$, мкм;
- средний шаг неровностей профиля, мм

$$Sm = \frac{\sum_{i=1}^{N} Sm_i}{N},$$

где Sm_i – значение i-го шага неровностей по средней линии в пределах базовой длины;

- средний шаг местных выступов профиля, мм

$$S = \frac{\sum_{i=1}^{N} S_i}{N},$$

где S_i – значение i-го шага по вершинам местных выступов;

- относительная опорная длина профиля, %

$$t_p = \frac{\sum_{i=1}^{n} \eta_{p_i}}{l} = \frac{\eta_p}{l} \cdot 100,$$

где η_p – опорная длина профиля на уровне p.

Волнистость (рис. 4.4) характеризуется [13]:

- средним арифметическим отклонением профиля волн, мкм

$$W_a = \frac{1}{l_W}\int_0^{l_W}|y_i|dx, \text{ или } W_a = \frac{\sum_{i=1}^{N}|y_i|}{N},$$

где l_W – базовая длина; y_i – текущее значение ординаты профиля волн; N – число ординат профиля;

Рис. 4.4. Волнограмма поверхности

- средней высотой волн, мкм

$$W_z = \frac{\sum_{i=1}^{5}H_i + \sum_{i=1}^{5}H_i'}{5},$$

где H_i, H_i' – текущее расстояние от средней линии до вершины и впадины волны соответственно;

- наибольшей высотой профиля волн $W_{\max}$;
- относительной опорной длиной профиля волн, %

$$t_{pW} = \frac{\sum_{i=1}^{n}\eta_{pW_i}}{l_W} = \frac{\eta_{pW}}{l_W}\cdot 100,$$

где η_{pW} – опорная длина профиля волн на уровне сечения p;

- средним шагом волн, мм

$$S_{mW} = \frac{\sum_{i=1}^{n}S_{mW_i}}{n},$$

где S_{mW_i} – текущее значение шага волн; n – число шагов;

- средним радиусом выступов волн, мм

$$R_{W_{\text{ср}}} = \frac{\sum_{i=1}^{n}R_{W_i}}{n},$$

где R_{W_i} – текущее значение радиуса выступа; n – число выступов волн.

Наклеп металла поверхностного слоя деталей оценивают, как правило, по микротвердости (рис. 4.5). При этом определяют глубину $h_н$ и степень наклепа

$$u_н = \frac{H_{\mu max} - H_{\mu исх}}{H_{\mu исх}} \cdot 100\,\%,$$

где $H_{\mu max}$ – максимальная микротвердость металла поверхностного слоя; $H_{\mu исх}$ – исходная микротвердость металла.

Остаточные напряжения (макронапряжения) в поверхностном слое деталей характеризуют их знаком (положительными считаются растягивающие напряжения, отрицательными – сжимающие), абсолютной величиной максимальных остаточных напряжений $\sigma_{ост_{max}}$ и глубиной залегания остаточных напряжений h_σ (рис. 4.5).

Отметим, что остаточные напряжения являются упругими напряжениями и не могут быть больше предела текучести материала.

Рис. 4.5. Схемы распределения микротвердости (H_μ) и осевых остаточных напряжений ($\sigma_{ост}$) по сечению вала

Следует подчеркнуть, что остаточные напряжения всегда уравновешиваются по сечению детали (см. рис. 4.5). Однако после чистовой обработки остаточные напряжения в сердцевине детали, уравновешивающие остаточные напряжения в относительно тонком поверхностном слое, как правило, оказываются малыми и их обычно не рассматривают. Нужно также иметь в виду, что в поверхностном слое деталей всегда имеет место плоское остаточное напряженное состояние. Поэтому остаточные напряжения анализируют в двух взаимно перпендикулярных направлениях, совпадающих с осями детали. Например, при обработке поверхности вращения детали будут иметь место осевые и окружные остаточные напряжения; при плоском шлифовании

плиты возникнут остаточные напряжения, действующие в направлениях продольной и поперечной подач круга. Остаточные напряжения, действующие по нормали к обработанной поверхности детали, обычно являются незначительными, и ими пренебрегают.

4.1.2.2. Измерение параметров качества поверхностного слоя

Измерение параметров шероховатости производят щуповыми и оптическими приборами. Большинство из этих приборов используют и для измерения волнистости. Для измерения волнистости на поверхностях вращения и сферах применяют кругломеры.

Для определения параметров наклепа поверхностного слоя используют микротвердомеры, на которых измеряют твердость путем вдавливания четырехгранной алмазной пирамиды при нагрузке до 2Н. Измерения микротвердости производят на косых шлифах, которые выполняют под углом $\alpha = 1\ldots5°$ к обработанной поверхности (рис. 4.6). Использование косых шлифов позволяет «растянуть» поверхностный слой и произвести необходимое число измерений. При изготовлении косого шлифа необходимо использовать такие методы обработки, которые практически исключают наклеп металла. Для этого обычно используют притирку алмазными пастами уменьшающейся зернистости или электрохимическую обработку. На некотором расстоянии от поверхности размеры отпечатков пирамиды (и микротвердость) перестают изменяться (рис. 4.6). Это расстояние и принимают за глубину наклепанного слоя $h_н$, которая связана с размером l, фиксируемом на микротвердомере соотношением

$$h_н = l \sin\alpha .$$

Рис. 4.6. Схема измерения микротвердости
(1 – обработанная поверхность детали; 2 – плоскость косого шлифа; 3 – наклепанный слой)

Для измерения остаточных напряжений находят применение два метода: механический и рентгеновский. Наибольшее распространение по-

лучил механический метод. Его суть состоит в последовательном удалении тонких напряженных слоев металла с обработанной поверхности детали и измерении происходящих при этом деформаций ее оставшейся части.

Для того чтобы суть механического метода определения остаточных напряжений была более понятной, рассмотрим простейший случай определения этих напряжений в пластинке (рис. 4.7), верхняя плоскость которой подвергнута обработке тем или иным методом. Примем, что глубина залегания остаточных напряжений h_σ намного меньше высоты пластинки h, т. е. $h_\sigma \ll h$. Изменение высоты пластинки h при удалении напряженных слоев будем считать незначительным.

Рис. 4.7. Схема к определению остаточных напряжений в пластинке

Предположим, что с пластинки снят дифференциально малый слой металла da с действовавшими в нем остаточными напряжениями $\sigma_{\text{ост}}$. Тогда пластинка, подвергаемая чистому изгибу остаточными напряжениями с моментом dM, получит прогиб

$$df = \frac{l^2}{8EI} dM .$$

Момент dM составит

$$dM = \sigma_{\text{ост}} b \cdot da \cdot \frac{h}{2} .$$

Подставляя это выражение в предыдущее уравнение и учитывая, что $I = \frac{bh^3}{12}$, получим

$$\sigma_{\text{ост}} = \frac{4Eh^2}{3l^2} \frac{df}{da}$$

или, заменяя дифференциалы приращениями,

$$\sigma_{\text{ост}} = \frac{4Eh^2}{3l^2} \frac{\Delta f}{\Delta a} .$$

Таким образом, для определения остаточных напряжений в поверхностном слое пластинки необходимо последовательно снимать с нее слои металла толщиной Δa и измерять возникающие при этом прогибы Δf. Удаление слоев обычно производится электрохимическим методом. Прогибы пластинки могут быть измерены индикаторным устройством.

Правило определения знаков прогибов Δf иллюстрирует рис. 4.8. Если после снятия слоя Δa пластинка изгибается так, как показано на рис. 4.8, *а*, то прогиб Δf является положительным, а остаточные напряжения – растягивающими. В противном случае (рис. 4.8, *б*) прогиб оказывается отрицательным, а остаточные напряжения – сжимающими.

Рис. 4.8. Схема определения знаков прогибов и остаточных напряжений при снятии слоя Δa: а – растягивающие напряжения в слое; б – сжимающие напряжения в слое

На некотором расстоянии от обработанной поверхности снятие очередного слоя металла уже не будет сопровождаться деформациями пластинки. Это расстояние и принимают за глубину залегания остаточных напряжений h_σ.

4.1.2.3. Влияние качества поверхностного слоя на эксплуатационные свойства деталей

Шероховатость поверхности. От нее в значительной степени зависят самые разнообразные эксплуатационные свойства деталей: трение и износ; контактная жесткость; коррозионная стойкость; усталостная прочность; прочность соединений с натягом; герметичность соединений; электроконтактное сопротивление; запыляемость поверхностей и многие другие свойства деталей.

Шероховатость поверхности оказывает значительное влияние на износ деталей в период приработки. В этот период (участок *I*, рис. 4.9) интенсивность износа наибольшая; она намного меньше и почти постоянна на участке *II* нормального износа. Катастрофический износ характеризует участок *III*. После приработки на деталях формируется шероховатость,

независящая от исходной, полученной при механической обработке, а определяемая только условиями трения (износа). Эта шероховатость, которую называют равновесной, может быть как меньше, так и больше исходной (рис. 4.10). Если исходная шероховатость больше равновесной, то при приработке имеет место срезание микронеровностей и постепенное уменьшение шероховатости до равновесной. Если исходная шероховатость меньше равновесной, то из-за плохого удержания смазки на деталях происходит схватывание и вырывание частиц металла и постепенное увеличение шероховатости до равновесной. Очевидно, что наименьший приработочный износ и наибольшая долговечность сопряжения будет обеспечиваться при исходной шероховатости деталей, близкой к равновесной. Именно такую шероховатость и нужно стремиться получить при их изготовлении.

Рис. 4.9. Износ поверхности детали во времени

От шероховатости поверхности во многом зависит контактная жесткость, которая определяется способностью поверхностных слоев контактирующих деталей сопротивляться действию сил, стремящихся их деформировать. Отметим, что контактные перемещения (в стыках деталей), обусловленные деформациями микронеровностей, составляют значительную часть в балансе упругих перемещений в машине. Так, в суппортах токарных станков контактные перемещения составляют 80…90 % от общих перемещений. Для повышения контактной жесткости необходимо уменьшать высотные параметры шероховатости (Ra, Rz) и увеличивать относительную опорную длину ее профиля t_p.

Шероховатость поверхности также влияет на коррозионную стойкость деталей. Увеличение высотных параметров шероховатости ведет к увеличению фактической площади поверхности детали и усиливает коррозию. Поэтому для обеспечения высокой коррозионной стойкости деталей шероховатость их поверхностей должна быть минимальной.

Очень существенное влияние шероховатость поверхности деталей оказывает на их усталостную прочность. Впадины профиля шероховатости являются концентраторами напряжений. Для поверхностей, обработанных резанием, коэффициент концентрации напряжений находится в пределах 1,5…2,5. Именно у впадин происходит образование усталостных трещин, приводящих к разрушению детали. Концентрация напряжений уменьшается, а усталостная прочность деталей возрастает по мере снижения высотных параметров шероховатости. Так, уменьшение шероховатости поверхности образцов из стали 30ХГСА ($HRC_э$35…37) с $Ra = 0{,}74$ мкм до Ra = 0,22 мкм приводит, по данным проф. А.Г. Суслова, к увеличению предела выносливости примерно на 14 %, а срока службы – более чем в 3 раза. Установлено, что концентрация напряжений у закономерно расположенных впадин в связи с саморазгружением оказывает меньшее влияние на усталостную прочность, чем концентрация напряжений около случайных царапин на поверхности деталей. Поэтому при их изготовлении возможность появления таких царапин (рисок) должна быть исключена.

Рис. 4.10. Зависимости шероховатости поверхности трущейся детали от времени: 1 – $Rz_{исх}$ = 5,4 мкм; 2 – $Rz_{исх}$ = 0,5 мкм; 3 – равновесная шероховатость

Волнистость поверхности. Она влияет на износостойкость, контактную жесткость, контактную усталостную прочность, плавность перемещения деталей и их вибрации. Особенно существенным является влияние волнистости на плавность перемещения и вибрации деталей. Наличие волнистости на шейках вала и подшипников скольжения, колец и тел качения подшипников качения, направляющих и ползуна обуславливает снижение точности и устойчивости движения, порождает вибрации и шум и приводит к уменьшению долговечности изделий. Для повышения всех указанных выше эксплуатационных свойств деталей и их сопряжений необходимо добиваться снижения высотных параметров волнистости (Wa, Wz, $W_{\max}$) и увеличения шага волн S_{m_W}. Так, например, установлено, что уменьшение высоты волн Wz с 2,5 до 1 мкм на дорожках качения подшипников повышает их долговечность более чем в 2 раза.

Наклеп поверхностного слоя. Наклеп поверхностного слоя деталей в значительной степени определяет их контактную жесткость, износостойкость, усталостную прочность и коррозионную стойкость. Увеличение степени наклепа и глубины наклепанного слоя способствует повышению контактной жесткости и износостойкости деталей (кроме случаев абразивного износа), а также усталостной прочности деталей, работающих при нормальной температуре. Для деталей из жаропрочных сплавов, эксплуатирующихся при высоких температурах (свыше 700 °С), наклеп вреден, так как способствует диффузии легирующих элементов из поверхностного слоя и его ослаблению. Наклеп поверхностного слоя также отрицательно сказывается и на коррозионной стойкости деталей.

Остаточные напряжения. Наибольшее влияние они оказывают на усталостную прочность деталей при нормальной и повышенной (до 700 °С) температуре. Причем сжимающие остаточные напряжения повышают усталостную прочность деталей, а растягивающие – снижают ее. Это объясняется тем, что сжимающие остаточные напряжения, суммируясь с напряжениями от внешней нагрузки (например, при знакопеременном изгибе вала), уменьшают уровень результирующих растягивающих напряжений в поверхностном слое детали и тем самым препятствуют зарождению усталостных трещин.

Установлено, что сжимающие остаточные напряжения могут повышать предел выносливости стальных деталей на 50 %, а растягивающие остаточные напряжения снижать его на 30 %.

При высоких температурах остаточные напряжения быстро релаксируют (снижаются) и их влияние на усталостную прочность деталей оказывается незначительным.

4.1.3. Технологическое обеспечение качества поверхностного слоя деталей

4.1.3.1. Обеспечение качества поверхностного слоя при обработке резанием

Формирование шероховатости поверхности при обработке резанием. Шероховатость поверхности деталей формируется главным образом на одной-двух последних операциях (переходах) технологического процесса, хотя в определенной степени она зависит и от ранее выполненных, например, термических операций. Каждому методу присущ тот или иной диапазон параметров шероховатости, а также направление следов обработки.

Формирование шероховатости поверхности при лезвийной обработке. При обработке резанием лезвийными инструментами шероховатость поверхности зависит от их геометрических параметров (углов в плане φ и φ_1, радиуса при вершине r, переднего и заднего углов), подачи S, скорости резания, условий охлаждения, физико-механических свойств материала детали, кинематических особенностей метода обработки, жесткости технологической системы и других факторов.

Рис. 4.11. Влияние на шероховатость поверхности при точении:
а, б, в – углов φ и φ_1; г, д – радиуса r при вершине резца;
ж, з – подачи S на оборот детали

На рис. 4.11 показано влияние геометрических параметров резца в плане (φ, φ_1, r) и подачи S на оборот заготовки на шероховатость поверхности при точении. Как видно из приведенных схем, снижения высоты неровностей можно добиться, уменьшая углы в плане (рис. 4.11, *а*, *б* и *в*), подачу (рис. 4.11, *ж* и *з*) и увеличивая радиус при вершине резца

(рис. 4.11, *г* и *д*). Для схемы (рис. 4.11, *а* и *б*) расчетная высота неровностей $Rz_{\text{расч}}$ составляет

$$Rz_{\text{расч}} = \frac{\text{tg}\varphi \cdot \text{tg}\varphi_1}{\text{tg}\varphi + \text{tg}\varphi_1} S.$$

Для схемы (рис. 4.11, *г* и *д*) $Rz_{\text{расч}}$ определяется по формуле проф. В.Л. Чебышева:

$$Rz_{\text{расч}} = \frac{S^2}{8r}.$$

Если резец снабдить вспомогательной режущей кромкой с $\varphi_1 = 0$ и длиной $f > S$ (рис. 4.11, *в*), то $Rz_{\text{расч}}$ будет равна нулю. Такой резец получил название резца В.А. Колесова (по фамилии токаря, предложившего эту конструкцию инструмента).

Фактическая высота неровностей при обработке лезвийными инструментами, как правило, оказывается больше расчетной. Это происходит из-за упруго-пластических деформаций материала поверхностного слоя, образования нароста на инструменте, наличия микронеровностей на его рабочих поверхностях, вырывания частиц материала из обрабатываемой поверхности (при обработке, например, чугунных заготовок) и вибраций в технологической системе, которые периодически изменяют взаимное расположение инструмента и заготовки. На рис. 4.12 в качестве примера показана схема увеличения высоты микронеровностей за счет пластического оттеснения материала со стороны вспомогательной режущей кромки резца. В результате оттеснения фактическая высота микронеровностей $Rz_{\text{факт}}$ оказывается больше $Rz_{\text{расч}}$ на величину Δ. В то же время следует иметь в виду, что, например при точении резцом с $\varphi > 90°$, может происходить срезание образующихся неровностей сходящей стружкой и уменьшение их фактической высоты по сравнению с расчетными значениями.

Рис. 4.12. Схема увеличения высоты микронеровностей за счет пластического оттеснения материала со стороны вспомогательной режущей кромки резца

Из параметров режима резания наибольшее влияние на шероховатость поверхности оказывают скорость резания и подача; влияние глуби-

ны резания t на шероховатость поверхности обычно является несущественным.

Скорость резания влияет на шероховатость, главным образом, через образование нароста на инструменте. Нарост искажает форму его режущей части и способствует увеличению шероховатости поверхности. Характерная зависимость параметра шероховатости Rz от скорости резания V показана на рис. 4.13 (кривая *1*). Для конструкционных углеродистых сталей практически полное отсутствие нароста и наименьшая шероховатость имеют место при $1 > V > 70$ м/мин. При этом фактическая высота неровностей оказывается близкой к ее расчетным значениям (прямая *2* на рис. 4.13).

Рис. 4.13. Влияние скорости резания при точении на параметр Rz шероховатости поверхности заготовок из стали 45 (кривая 1): $S = 0{,}5$ мм/об; $t = 1$ мм; $r = 1{,}5$ мм; $\gamma = 12°$; $\varphi = \varphi_1 = 45°$. Прямая 2 – расчетное значение высоты неровностей

Рис. 4.14. Влияние подачи при точении на параметр Rz шероховатости поверхности заготовок из стали 18Х2Н4ВА (кривая 1): $V = 130$ м/мин; $t = 0{,}25$ мм; $r = 0{,}5$ мм; $\varphi = 60°$; $\varphi_1 = 30°$. Кривая 2 – расчетное значение высоты неровностей (данные А.Д. Макарова)

Характерная зависимость параметра шероховатости Rz от подачи приведена на рис. 4.14 (кривая *1*). Уменьшение подачи в диапазоне 0,17–0,09 мм/об снижает фактическую высоту неровностей, которая в этом диапазоне оказывается близкой к расчетной (кривая *2* на рис. 4.14). Дальнейшее уменьшение подачи (до 0,03 мм/об) не обеспечивает уменьшения фактической высоты неровностей, которая становится практиче-

ски постоянной и значительно большей ее расчетных значений. Это объясняется тем, что в области малых подач возрастают упруго-пластические деформации материала поверхностного слоя, вызывающие увеличение фактической высоты неровностей.

Таким образом, при точении стандартными резцами использование подач, меньших 0,06–0,08 мм/об, является нецелесообразным, так как не дает возможность уменьшить шероховатость и ведет к снижению производительности обработки. Однако при высокоскоростном алмазном точении заготовок из алюминия и меди применяют намного меньшие подачи (около 0,005 мм/об). При этом благодаря высокой остроте режущих кромок инструмента получают шероховатость поверхности, соответствующую $Rz = 0{,}025\ldots0{,}050$ мкм. Отметим, что при больших подачах (около 1 мм/об) получить относительно небольшую высоту микронеровностей обработанной поверхности можно при использовании резцов В.А. Колесова и их модификаций.

Существенное влияние на шероховатость поверхности при обработке резанием лезвийными инструментами оказывает химический состав, зернистость и структура материала заготовки. При обработке заготовок из низкоуглеродистых сталей шероховатость поверхности оказывается большей, чем у менее пластичных высокоуглеродистых. Меньшие параметры шероховатости поверхности стальных заготовок обеспечиваются при однородной мелкозернистой структуре. Такая структура может быть получена при нормализации или отжиге заготовок. Применение смазочно-охлаждающих технологических сред (СОТС) уменьшает трение инструмента о заготовку и способствует снижению значений параметров шероховатости.

Формирование шероховатости при абразивной обработке. Большинство видов абразивной обработки (шлифование, полирование, хонингование, суперфиниширование) представляют собой массовое микрорезание – царапание материала заготовки и его пластическое деформирование абразивными зернами инструмента. При абразивной обработке, в частности при шлифовании, профиль шероховатости формируется многократным прохождением абразивных зерен через данное сечение заготовки (рис. 4.15).

Рис. 4.15. Схема формирования профиля шероховатости при шлифовании: 1 – исходный профиль; 2, 3 – риски после прохода соответственно первого и второго ряда зерен; 4 – профиль шероховатости после этих проходов

При круглом наружном шлифовании с продольной подачей (рис. 4.16) шероховатость поверхности зависит от ряда факторов: зернистости шлифовального круга, его скорости $V_к$, скорости вращения заготовки $V_з$, продольной подачи $S_{прод}$ (в долях ширины круга $B_к$ или в мм на 1 оборот заготовки), продолжительности выхаживания, режима и условий правки круга и других.

Рис. 4.16. Схема круглого наружного шлифования

Уменьшение зернистости круга, скорости вращения заготовки и продольной подачи и увеличение скорости круга приводят к росту числа зерен, проходящих через данное сечение заготовки, и снижению параметров шероховатости.

Важное влияние на шероховатость оказывает заключительный этап шлифования – выхаживание, которое ведется при отсутствии поперечной подачи. По мере увеличения продолжительности выхаживания не только возрастает число зерен, взаимодействующих с заготовкой, но и увеличивается число зерен, осуществляющих только пластическое деформирование (выглаживание) поверхностного слоя, что обеспечивает значительное уменьшение шероховатости.

Шероховатость поверхности при шлифовании существенно зависит от режима правки круга. Правку в большинстве случаев производят путем обтачивания вращающегося на рабочей скорости круга алмазными карандашами или алмазными кристаллами, закрепленными в оправе. При этом на рабочей поверхности круга формируются неровности, которые при шлифовании трансформируются в неровности поверхности заготовки. Для того чтобы неровности на круге были минимальны, правку необходимо выполнять с малыми подачами правящего инструмента, которые должны составлять 0,01…0,02 мм/об круга.

Отметим, что уменьшение зернистости круга приводит к падению производительности шлифования. Для ее повышения шлифование выполняют за две операции. При предварительном шлифовании, когда удаляется относительно большой припуск, применяют более крупнозернистые круги, при окончательном – более мелкозернистые. В ряде случаев

используют тонкое шлифование, когда припуск на диаметр не превышает 0,05…0,1 мм.

Предварительное шлифование обеспечивает $Ra = 1{,}25\ldots2{,}5$ мкм, окончательное – $Ra = 0{,}2\ldots1{,}25$ мкм, тонкое – $Ra = 0{,}025\ldots0{,}1$ мкм.

Формирование волнистости при обработке резанием. Образование волнистости при обработке резанием в основном происходит из-за колебаний в технологической системе станок–приспособление–инструмент–заготовка, а также вследствие переноса на обработанную поверхность волнистости технологических баз и режущих кромок инструмента. Например, при обтачивании наружной поверхности заготовки инструмент относительно нее может колебаться в радиальном направлении. Вследствие чего на поверхности заготовки образуются продольные (совпадающие с направлением скорости резания) и поперечные (совпадающие с направлением подачи) волны (рис. 4.17).

Рис. 4.17. Образование продольной и поперечной волн:
f – частота колебаний резца

Для уменьшения волнистости необходимо:

- повышать жесткость технологической системы;
- обеспечивать тщательную балансировку вращающихся частей технологической системы (шлифовальных кругов, шпинделей и др.); при обработке несимметричных заготовок использовать противовесы;
- обеспечивать изоляцию станка от внешних источников колебаний (использование виброопор, изолированных фундаментов и т. п);
- снижать волнистость технологических баз и режущих кромок инструментов;
- оптимизировать геометрию режущего инструмента и параметры режима резания (увеличивать углы в плане, отношение толщины срезаемого слоя к его ширине, применять инструменты с наклонными зубьями или переменным шагом зубьев, избегать скоростей резания, соответствующих зоне интенсивных колебаний технологической системы и т. п.);
- применять инструменты с виброгасителями.

На рис. 4.18, в качестве примера, приведена конструктивная схема одного из наиболее простых и эффективных виброгасителей – кольцевого виброгасителя ударного действия. Он представляет собой присоединенную массу (кольцо *3*), колеблющуюся со сдвигом фазы на π относительно колебаний державки *1*, за счет чего и происходит гашение последних.

Рис. 4.18. Схема кольцевого виброгасителя ударного действия:
1 – державка расточного резца; 2 – направляющие кольца;
3 – колеблющееся кольцо; 4 – расточной резец

Наименьшая волнистость обеспечивается при использовании таких отделочных методов обработки резанием, как тонкое шлифование, притирка, суперфиниширование и хонингование. Например, при круглом наружном шлифовании на станках нормальной точности высота волнистости Wz в среднем составляет 1…3 мкм, на станках высокой точности – 0,3…0,5 мкм. При притирке и суперфинишировании обеспечивается высота волнистости $Wz = 0{,}1$ мкм и менее.

Формирование наклепа поверхностного слоя при обработке резанием. Параметры наклепа определяются конкурирующим влиянием силы резания, с увеличением которой интенсифицируются пластические деформации поверхностного слоя заготовки и наклеп возрастает, и температуры резания, повышение которой способствует снятию наклепа.

Степень наклепа и глубина наклепанного слоя зависят от метода и режима обработки резанием, геометрии режущего инструмента, его износа, а также от химического состава и структуры материала заготовки, определяющих его упрочняемость.

Приближенно можно считать, что всякое изменение условий резания, вызывающее увеличение силы резания, ведет к росту степени наклепа и глубины наклепанного слоя. Наоборот, всякое изменение условий резания, сопровождающееся ростом температуры резания, обуславливает снижение параметров наклепа.

Так, при точении с уменьшением переднего угла резца и скорости резания и увеличения подачи и глубины резания параметры наклепа поверхностного слоя заготовок возрастают. Увеличение переднего угла и

скорости резания и уменьшение подачи и глубины резания приводят к противоположному результату.

При круглом шлифовании наклеп поверхностного слоя возрастает с увеличением зернистости круга и скорости вращения заготовки. При увеличении скорости круга нагрузка на абразивные зерна падает, а температура шлифования повышается, что снижает параметры наклепа.

На рис. 4.19 для примера показано распределение микротвердости по глубине поверхностного слоя заготовки после чистового точения. В табл. 4.1 приведены данные о степени и глубине наклепа при различных методах обработки.

Рис. 4.19. Распределение микротвердости по глубине поверхностного слоя заготовки из сплава ХН77ТЮР после точения: $t = 1$ мм; $S = 0{,}08$ мм/об; $V = 34$ м/мин. Резец из сплава ВК6М; $\gamma = 10°$; $\alpha = \alpha_1 = 10°$; $r = 1$ мм; $\varphi = \varphi_1 = 45$; $\lambda = 0°$ (данные А.Д. Макарова)

Таблица 4.1

Степень и глубина наклепа при разных методах обработки (по данным Э.В. Рыжова)

Метод обработки	Степень наклепа, %	Глубина наклепа, мкм
Точение:		
обычное	20…50	30…50
тонкое	40…80	20…60
Фрезерование:		
торцовое	40…60	40…100
цилиндрическое	20…40	40…80
Сверление и зенкерование	60…70	160…200
Развертывание	–	150…200
Протягивание	50…100	20…75
Зубофрезерование и зубодолбление	60…100	120…150
Шевингование зубьев	–	до 100
Шлифование:		
круглое – деталей из сталей:		
незакаленной углеродистой	40…60	30…60
закаленной низкоуглеродистой	25…30	20…40
плоское	50	16…35

Формирование остаточных напряжений при обработке резанием. Формирование остаточных напряжений в поверхностном слое заготовок при обработке резанием (так же как и наклепа) происходит под влиянием силового и температурного факторов.

При лезвийной обработке преобладает силовой фактор. Под действием сил резания в зависимости от пластичности материала заготовок возможны различные по знаку пластические деформации в поверхностном слое.

При обработке заготовок из малопластичных сталей и сплавов, дающих элементную стружку, поверхностный слой испытывает пластическое растяжение, а нижеследующие слои растягиваются упруго. После прекращения процесса резания упруго растянутые слои стремятся вернуться в исходное положение, но этому препятствует пластически деформированный наружный слой. В результате в поверхностном слое формируются сжимающие остаточные напряжения.

При обработке заготовок из пластичных металлов, дающих сливную стружку, знак пластической деформации в поверхностном слое изменяется на противоположный и в нем возникают растягивающие остаточные напряжения.

Рис. 4.20. Распределение окружных остаточных напряжений по глубине поверхностного слоя при точении заготовок из стали ШХ15 с $HRC_Э 23$ (кривая 1) и $HRC_Э 62$ (кривая 2): $V = 75$ м/мин; $S = 0{,}078$ мм/об; $t = 0{,}2$ мм. Резец из эльбора-Р; $\gamma = 0°$ (данные Б.А. Кравченко)

Сказанное подтверждают результаты определения остаточных напряжений при точении заготовок из стали ШХ15 различной твердости, приведенные на рис. 4.20. Из него видно, что при точении резцом из эльбора-Р «сырых» заготовок ($HRC_Э 23$), когда формируется сливная струж-

ка, в поверхностном слое наводятся растягивающие остаточные напряжения (кривая *1*). При точении при тех же условиях закаленных до высокой твердости заготовок ($HRC_Э 62$), когда образуется элементная стружка, в поверхностном слое создаются сжимающие остаточные напряжения (кривая *2*).

При шлифовании заготовок формирование остаточных напряжений в основном происходит под влиянием температурного фактора. При этом методе обработки происходит быстрый нагрев и охлаждение поверхностного слоя заготовки (мгновенные температуры при шлифовании достигают температуры плавления стали). При нагреве поверхностный слой стремится удлиниться, но этому препятствуют нижележащие слои. В результате поверхностный слой претерпевает так называемые термопластические деформации (деформации сжатия), и в нем возникают растягивающие остаточные напряжения.

При обработке резанием, особенно при шлифовании, в поверхностном слое заготовки могут происходить фазовые превращения, сопровождающиеся изменением удельного объема металла. Например, при шлифовании закаленных стальных заготовок со структурой мартенсита может происходить на отдельных участках отпуск и образование структур троостита и сорбита, имеющих меньший удельный объем, чем структура мартенсита. В итоге в поверхностном слое заготовок на этих участках возникают растягивающие остаточные напряжения.

Изменяя режимы и условия обработки резанием, можно в определенных пределах влиять на остаточные напряжения в поверхностном слое. Так, например, уменьшая передний угол резца, можно снизить уровень растягивающих остаточных напряжений, возникающих при точении заготовок из пластичных металлов. Существенного уменьшения растягивающих остаточных напряжений в поверхностном слое заготовок при шлифовании можно добиться за счет увеличения продолжительности выхаживания.

Формирование сжимающих остаточных напряжений в поверхностном слое заготовок обеспечивается при использовании отделочных методов абразивной обработки: полирования, суперфиниширования и хонингования, выполняемых с относительно низкими скоростями резания.

Следует отметить, что обработкой резанием в ряде случаев трудно обеспечить требуемый комплекс свойств поверхностного слоя деталей. Например, для достижения высокой усталостной прочности деталей, работающих при нормальной температуре, необходимы малая шероховатость их поверхностей, наличие значительного наклепа поверхностного слоя и сжимающих остаточных напряжений в этом слое, чего практически невозможно добиться при обработке резанием. Действительно, чтобы

получить малую шероховатость поверхности, обработку нужно вести на высокой скорости резания при малой подаче и глубине, а чтобы обеспечить значительный наклеп поверхностного слоя и сжимающие остаточные напряжения в нем, обработку, наоборот, необходимо выполнять при относительно малой скорости резания, большой подаче и глубине. Поэтому для обеспечения необходимых параметров качества поверхностного слоя деталей используют другие методы обработки. Рассмотрим некоторые из них.

4.1.3.2. Обеспечение качества поверхностного слоя поверхностным пластическим деформированием (ППД)

Методы обработки ППД основаны на холодном пластическом деформировании поверхностного слоя заготовки, осуществляемом различными инструментами. К этим методам обработки (рис. 4.21) относятся: обкатывание шариками и роликами; алмазное выглаживание; обработка дробью; дорнование и ряд других.

Обработка ППД обеспечивает значительный наклеп поверхностного слоя и формирование в нем сжимающих остаточных напряжений, а также, как правило, малую шероховатость поверхности, что повышает усталостную прочность, износостойкость, контактную жесткость, надежность посадок и другие эксплуатационные свойства деталей и их соединений.

Методы обработки ППД в целом достаточно просты. В условиях единичного и серийного производства обкатывание шариком и роликом, алмазное выглаживание выполняют на токарных и фрезерных станках. Дорнование осуществляют на протяжных станках, гидравлических и пневматических прессах небольшой мощности. В массовом производстве для обкатывания шариком и роликом, алмазного выглаживания и дорнования находят применение специальные станки-автоматы. Обработка дробью обычно требует использования специального оборудования.

При *обкатывании шариками* (рис. 4.21, *а*) инструментом служит шарик из закаленной стали ШХ15 или твердого сплава, который при работе опирается на подшипник и поджимается к заготовке с радиальной силой P. При вращении заготовки и включении подачи шарик обкатывается по обрабатываемой поверхности с небольшим проскальзыванием. Поджим шарика к заготовке в большинстве случаев осуществляется через пружину, что необходимо для обеспечения постоянства силы P при наличии радиального биения заготовки.

Рис. 4.21. Схемы обработки заготовок методами ППД:
а – обкатывания шариком; б – раскатывания шариковой раскаткой;
в – обкатывания роликом; г – алмазного выглаживания; д – дробеструйной обработки; е – дорнования шариком; ж – дорнования многозубым дорном.
1 – заготовка; 2 – инструмент

Диаметр шарика обычно составляет 5…10 мм, сила P принимается равной 500…2000 Н, скорость вращения заготовки – $V \approx 30…150$ м/мин, подача – $S = 0{,}06…0{,}12$ мм/об. Обкатывание шариками, как правило, осуществляется с применением СОТС, в качестве которых используются минеральные масла.

Установлено, что скорость V и подача S при их изменении в указанных пределах оказывает слабое влияние на параметры качества поверхностного слоя. В основном они определяются контактными давлениями в очаге пластических деформаций, которые зависят от силы P и диаметра шарика.

Представление о технологических возможностях обкатывания шариками дают данные, приведенные на рис. 4.22–4.24. Как видно из рис. 4.22 и 4.23, обкатывание шариком позволяет обеспечить сильный наклеп металла поверхностного слоя и наведение в нем сжимающих остаточных напряжений, параметры которых возрастают с увеличением силы P. Одновременно при обкатывании шариком идет интенсивное сглаживание исходных микронеровностей (рис. 4.24). При этом параметр шероховатости Ra с увеличением силы P снижается, достигает минимума, а затем возрастает. Последнее происходит из-за перенаклепа* металла и шелушения поверхностного слоя. Таким образом, существует оптимальное значение силы P (контактного давления), превышение которого является недопустимым. В целом при обкатывании шариком заготовок из «сырых» сталей шероховатость поверхности снижается в 9…20 раз, из закаленных до высокой твердости сталей – в 3…6 раз и обеспечивается значение $Ra = 0{,}1\ldots0{,}2$ мкм.

Обкатывание шариком обычно используют в качестве метода финишной обработки наружных и внутренних цилиндрических поверхностей (валов, полых цилиндров и т. п.), реже – плоских и фасонных поверхностей. При этом для обработки отверстий широко применяют многошариковые раскатки (рис. 4.21, *б*), которые обеспечивают высокую производительность (подача увеличивается пропорционально числу шариков).

Обкатывание роликом (рис. 4.21, *в*) по существу мало отличается от обкатывания шариком, однако является более производительным. В большинстве случаев обкатывание ведут роликами с тороидальным профилем, которые изготавливают из закаленной стали ШХ15. Профильный радиус R ролика и силу P поджима ролика к заготовке выбирают из условия обеспечения необходимого контактного давления в очаге пластических деформаций. Для обкатывания, например, крупных валов, когда для обеспечения их высокой усталостной прочности нужно получить большую глубину наклепанного слоя и залегания сжимающих остаточных напряжений (до 10 мм и более), используют ролики с профильным радиусом $R = 50\ldots100$ мм. Сила P при обкатывании такими роликами составляет 50…60 кН, подача – $S = 0{,}5\ldots0{,}7$ мм/об.

---

* Перенаклеп поверхностного слоя возможен при всех методах обработки ППД.

Рис. 4.22. Распределение твердости в поверхностном слое заготовок из стали 20, обкатанных с различными силами шариком диаметром 10 мм: 1 – 250 Н; 2 – 750 Н; 3 – 1000 Н (данные Д.Д. Папшева)

Рис. 4.23. Распределение окружных остаточных напряжений в поверхностном слое заготовок из стали 45 после обкатывания шариком диаметром 10 мм с силами: 1 – 500 Н; 2 – 1000 Н; 3 – 2000 Н (по данным Д.Д. Папшева)

Рис. 4.24. Зависимости шероховатости поверхности от силы при обкатывании шариком диаметром 10 мм: 1 – сталь 20; 2 – сталь 45 (по данным Д.Д. Папшева)

При *алмазном выглаживании* (рис. 4.21, *г*), которое протекает в условиях трения скольжения, инструментом служит алмаз, впаянный в металлическую державку. При этом методе обработки обязательно применение СОТС, лучшей из которых является индустриальное масло И-20. Рабочая часть алмаза обычно выполняется в виде сферы с радиусом $R = 0{,}6\ldots4{,}0$ мм. Высокая твердость алмаза и низкий коэффициент трения (0,03…0,11) позволяют эффективно выглаживать заготовки из различных металлов, в том числе из закаленных до высокой твердости сталей, а также заготовки с металлическим покрытием (хромовым, никелевым, серебряным). Малый радиус сферы алмаза требует небольших сил поджатия к заготовке ($P = 100\ldots300$ Н), что дает возможность производить обработ-

ку маложестких заготовок. Скорость алмазного выглаживания составляет от 10 до 300 м/мин, подача – 0,02…0,08 мм/об.

Алмазному выглаживанию подвергают наружные и внутренние поверхности вращения (цилиндрической, сферической и другой формы), а также торцевые поверхности. Прерывистые поверхности из-за повышенной хрупкости алмаза выглаживать не рекомендуется.

Алмазное выглаживание позволяет обеспечить малую шероховатость поверхности (до $Ra = 0{,}05\ldots0{,}1$ мкм), а также упрочнить поверхностный слой (степень наклепа может составлять 60 %, глубина наклепанного слоя – 0,4 мм). В поверхностном слое после алмазного выглаживания создаются сжимающие остаточные напряжения. Например, при выглаживании заготовок из стали 45 после нормализации они составляют 200…350 МПа, после закалки – 700…1000 МПа.

Обработка дробью (рис. 4.21, *д*) осуществляется ее ударами по поверхности заготовки (скорость дроби составляет 1…100 м/с). От этих ударов поверхностный слой заготовки пластически деформируется (обработанная поверхность представляет собой совокупность пластических отпечатков дроби), получает значительный наклеп, и в нем создаются сжимающие остаточные напряжения.

Характеристика инструмента (дроби), применяемого при рассматриваемом методе обработки, приведена в табл. 4.2. Из нее видно, что в качестве инструмента используют: стальную литую и рубленную дробь; чугунную литую; шарики из закаленной стали ШХ15; стеклянную дробь; стальные микрошарики. Стальную и чугунную дробь применяют для обработки заготовок из различных металлов и сплавов, стеклянную дробь – при обработке заготовок из цветных металлов и сплавов, когда требуется обеспечить высокую химическую чистоту поверхности и недопустимо ее «железнение».

Таблица 4.2.

Характеристика дроби

Дробь	Диаметр дроби, мм
Стальная литая	0,2…3,6
Чугунная литая	0,2…3,6
Стальная рубленная из пружинной проволоки	1…2,5
Шарики (ШХ 15)	1…10
Стеклянная	0,025…1,2
Микрошарики (стальные)	0,03…0,3

Основными параметрами обработки дробью являются: диаметр дроби; скорость полета дроби V, угол атаки α и время обработки. От них зависят степень пластической деформации поверхностного слоя и глубина

наклепа, остаточные напряжения и шероховатость поверхности. Обычно угол атаки стремятся принять равным 90 °. Время обработки определяют из условия сплошного покрытия поверхности заготовки отпечатками дроби и «насыщения» упрочнением. Это время, как правило, определяют экспериментально по прогибу контрольных пластин.

Обработку дробью можно разделить на две основные разновидности: дробеструйную и гидродробеструйную обработки.

При дробеструйной обработке дробь (обычно литая чугунная) направляется на обрабатываемую поверхность потоком воздуха. При этом температура на поверхности заготовки достигает 600 °С, что вызывает некоторое снижение параметров наклепа поверхностного слоя и сжимающих остаточных напряжений. Другим недостатком дробеструйной обработки является формирование относительно грубой шероховатости ($Ra = 2{,}5 \ldots 5$ мкм), что происходит из-за неправильной формы дроби.

При гидродробеструйной обработке используют шарики из закаленной стали ШХ15 (от подшипников), которые направляют на заготовку в потоке смазочно-охлаждающей жидкости, например трансформаторного масла. При такой обработке, благодаря высокой точности формы шариков. обеспечивается шероховатость поверхности, соответствующая $Ra = 0{,}16 \ldots 0{,}63$ мкм, а также увеличиваются (из-за снижения температуры) наклеп и величина сжимающих остаточных напряжений.

Глубина наклепанного слоя при дробеструйной и гидродробеструйной обработке не превышает 0,8 мм.

Обработка микрошариками производится без применения смазочно-охлаждающей жидкости. Тем не менее при этом методе обработки достигается малая шероховатость поверхности ($Ra \leq 0{,}63$ мкм), а также формируются оптимальные параметры наклепа и сжимающих остаточных напряжений. Глубина наклепанного слоя при обработке микрошариками составляет не более 0,2 мм.

Обработку дробью используют для упрочнения деталей сложной формы и малой жесткости: зубчатые колеса, листовые рессоры, винтовые пружины, турбинные лопатки, штампы и т. п. Например, за счет дробеструйной и гидродробеструйной обработок долговечность пружин подвесок автомобиля увеличивается соответственно в 5 и 20 раз. Обработка микрошариками позволяет упрочнять детали с острыми кромками, канавками, резьбами и другими маложесткими элементами.

При *дорновании* в качестве инструмента используют шары (рис. 4.21, *е*), однозубые и многозубые дорны (рис. 4.21, *ж*), которые перемещают через обрабатываемое отверстие заготовки с некоторым натягом. При этом диаметр отверстия возрастает, повышается его точность, сглаживаются микронеровности, поверхностный слой приобретает на-

клеп, в нем (при оптимальных режимах) формируются сжимающие остаточные напряжения. Таким образом, в отличие от рассмотренных выше методов обработки ППД, которые почти не оказывают влияния на точность заготовок, дорнование дает возможность существенно повысить точность отверстий.

Дорнование ведут с обязательным использованием СОТС, которыми, в большинстве случаев, служат минеральные масла. Обработку осуществляют как по схеме прошивания, так и протягивания. Для обеспечения высокой износостойкости и исключения схватывания с металлом заготовки шары и рабочие элементы дорнов выполняют из твердого сплава.

Основными параметрами режима дорнования являются суммарный натяг и натяг «на зуб» дорна, которые определяют контактные давления в очаге пластических деформаций, качество поверхностного слоя и точность отверстий. Суммарный натяг может составлять от 0,5 до 10…15 % от диаметра отверстия. Высокое качество поверхностного слоя и точность отверстий могут быть достигнуты только при малых (0,01…0,03 мм) натягах на одном-двух последних зубьях дорна. Поэтому при обработке отверстий за один переход шаром или однозубым дорном для получения высокого качества поверхностного слоя и точности необходима их тщательная предварительная обработка (тонкое растачивание, развертывание, шлифование). Скорость дорнования составляет от 1 до 30 м/мин и не оказывает существенного влияния на результаты обработки.

Дорнование позволяет получить шероховатость поверхности, соответствующую $Ra = 0{,}1\ldots0{,}32$ мкм, и точность $IT5\ldots IT8$. Его применяют для обработки отверстий диаметром от 1 до 150 мм глубиной до 100 диаметров в заготовках из различных сталей, чугуна, цветных металлов и сплавов с твердостью в основном не более $HRC_э = 40\ldots45$. Иногда дорнование используют и для обработки отверстий в заготовках из закаленных сталей с $HRC_э = 60\ldots65$.

За счет дорнования значительно возрастают усталостная прочность и износостойкость деталей, а также прочность соединений с натягом.

4.1.3.3. Обеспечение качества поверхностного слоя электрохимической обработкой и вакуумным отжигом

Из изложенного выше следует, что если деталь работает при больших переменных нагрузках в условиях высокой температуры, то для достижения ее высокой усталостной прочности не только шероховатость поверхности, но и наклеп поверхностного слоя и остаточные напряжения должны быть минимальны. В общем такие же требования предъявляются к качеству поверхностного слоя деталей, работающих в агрессивных сре-

дах. Обеспечить указанный комплекс параметров качества поверхностного слоя можно, используя электрохимическую обработку (ЭХО).

На рис. 4.25 показана схема ЭХО заготовки турбинной лопатки. Обработка ведется в герметичной камере одновременно двумя инструментами, имеющими форму поверхностей лопатки. Инструменты обычно выполняют из латуни или коррозионно-стойкой стали. Заготовку подсоединяют к положительному полюсу источника постоянного тока, инструмент – к отрицательному. Через зазор между заготовкой и инструментами прокачивают электролит, в качестве которого часто используют 20%-й раствор хлористого натрия в воде. Зазор составляет 0,05…0,3 мм, напряжение – 3…30 В, плотность тока – 10…500 А/см^2. Подача S жестко не задается, а регулируется по силе тока и составляет 0,1…20 мм/мин. При снятии небольших припусков ЭХО возможна и при неподвижных инструментах.

Рис. 4.25. Схема электрохимической обработки заготовки турбинной лопатки: 1 – инструменты; 2 – заготовка

Удаление металла при ЭХО, как уже отмечалось, происходит путем его анодного растворения. Вследствие этого в поверхностном слое заготовки исключается наклеп и остаточные напряжения, а также достигается малая шероховатость обработанных поверхностей ($Ra = 0{,}1\ldots0{,}63$ мкм). Последнее объясняется концентрацией линий тока на выступах исходных микронеровностей и более быстрым растворением металла на них, чем на впадинах.

Необходимо отметить, что кроме указанных возможностей формирования параметров качества поверхностного слоя, ЭХО обладает и такими важными достоинствами, как:

- высокая производительность;
- незначительное силовое воздействие на заготовку, что обеспечивает возможность обработки маложестких заготовок;
- полное отсутствие при нормальном протекании процесса износа инструментов.

Погрешность электрохимической обработки заготовок составляет 0,02…0,2 мм.

При ЭХО заготовок из некоторых металлов и сплавов, как уже указывалось, может происходить расстравливание по границам зерен глубиной до 30 мкм. Его можно избежать путем увеличения плотности тока в конце ЭХО. Если это сделать не удается, то для удаления следов расстравливания применяют механическое полирование, которое вызывает незначительный наклеп и сжимающие остаточные напряжения в поверхностном слое заготовки.

В ряде случаев ЭХО может оказаться неприемлемой. Тогда для снятия наклепа и остаточных напряжений в поверхностном слое заготовок после окончательной обработки резанием используют отжиг в вакууме или нейтральной среде.

4.2. Технологическое обеспечение точности детали

Получение детали относительно высокой точности требует, как правило, выполнения нескольких технологических переходов или операций. Например, посадочные шейки вала ($IT6$, $Ra \leq 0{,}63$ мкм) должны быть подвергнуты черновому и чистовому точению, предварительному и окончательному шлифованию. Еще более сложным может быть, как показано в разд. 3, формирование точности осевых размеров вала. В связи с этим сперва целесообразно рассмотреть вопросы образования погрешностей и обеспечения точности при выполнении отдельного перехода, а затем уже – при выполнении всего технологического процесса изготовления детали.

4.2.1. Причины образования погрешностей обработки и обеспечение точности на технологическом переходе

Общая (суммарная) погрешность обработки заготовок на металлорежущих станках вызывается следующими основными причинами:

- геометрическими погрешностями станка;
- упругими деформациями технологической системы от сил резания;
- износом режущего инструмента;
- температурными деформациями технологической системы:
- деформациями заготовок от остаточных напряжений;
- погрешностью изготовления мерного режущего инструмента;
- погрешностью теоретической схемы обработки;
- погрешностью установки заготовок;
- погрешностью размерной настройки технологической системы;
- погрешностью измерений.

Каждая из перечисленных причин приводит к образованию погрешностей обработки, которые принято называть элементарными. Эти погрешности могут быть систематическими или случайными. Систематические погрешности, в свою очередь, могут быть постоянными, повторяющимися без изменения при обработке каждой заготовки, и переменными, изменяющимися от одной заготовки к другой по определенному закону.

Деление погрешностей обработки на систематические и случайные является условным, так как одна и та же погрешность в зависимости от конкретных условий обработки может быть отнесена либо к систематическим, либо к случайным погрешностям. Например, погрешность угла профиля конкретного экземпляра резьбового резца при обработке отдельной партии заготовок будет вызывать постоянную систематическую погрешность угла профиля нарезанной резьбы. Если же обработка будет вестись на разных станках с использованием различных экземпляров резьбовых резцов, имеющих разные значения угла профиля, то погрешность этого угла будет приводить уже к случайной погрешности угла профиля полученной резьбы.

4.2.1.1. Геометрические погрешности станка

Любой станок имеет некоторые погрешности движения и положения рабочих органов. Эти погрешности определяются в ненагруженном состоянии станка при медленном, обычно ручном, перемещении рабочих органов и получили название геометрических погрешностей. Они являются результатом неточностей изготовления деталей и сборки станка, а также износа его деталей. В некоторых случаях геометрические погрешности станка могут быть вызваны его деформациями из-за неправильной установки на фундаменте или регулируемых опорах.

К геометрическим погрешностям станка относят: радиальное и торцовое биение шпинделей; отклонение от прямолинейности направляющих; отклонение от параллельности направляющих продольного суппорта токарного станка относительно оси его шпинделя в горизонтальной и вертикальной плоскостях; отклонение от перпендикулярности оси шпинделя вертикально-сверлильного станка относительно плоскости его стола и т. п.

Геометрические погрешности станков ограничиваются нормами точности по соответствующим ГОСТам. Например, допуск радиального биения шпинделей токарных и фрезерных станков нормальной точности ориентировочно составляет 0,01…0,02 мм, а допуск прямолинейности направляющих на длине 1000 мм – 0,02 мм. С повышением класса точности станка (табл. 4.3) его геометрические погрешности уменьшаются, а трудоемкость изготовления станка возрастает.

Таблица 4.3

Классификация станков по точности

Класс точности станков	Погрешность, %	Трудоемкость изготовления, %
Нормальной точности (Н)	100	100
Повышенной точности (П)	60	140
Высокой точности (В)	40	200
Особо высокой точности (А)	25	280
Особо точные (С)	16	450

Геометрические погрешности станка в той или иной степени переносятся на погрешности размеров, формы и расположения поверхностей обрабатываемой заготовки.

Рис. 4.26. Схемы образования конусности поверхностей заготовки при обработке на токарном станке из-за его геометрических погрешностей

На рис. 4.26 показаны схемы образования конусности поверхностей заготовки при обработке на токарном станке, вызываемые отклонениями

в горизонтальной плоскости относительно оси шпинделя: от параллельности направляющих продольного суппорта (рис. 4.26, *а*); перпендикулярности направляющих поперечного суппорта (рис. 4.26, *б*); соосности центра задней бабки (рис. 4.26, *в*). Видно, что эти отклонения полностью переносятся на конусность поверхностей заготовки.

На рис. 4.27 приведена схема влияния отклонения от параллельности направляющих продольного суппорта относительно оси шпинделя токарного станка в вертикальной плоскости на погрешность формы поверхности заготовки. При этом отклонении, равном b на длине l заготовки, резец перемещается по прямой AC, т. е. если в точке A, например, он находится на уровне высоты центров станка, то в точке C превышает этот уровень на b. В результате поверхность заготовки приобретает форму гиперболоида вращения. Обозначив радиус обработанной поверхности заготовки при $x = 0$ через r_0, найдем наибольший радиус $r_{\max}$, который будет иметь заготовка в крайнем правом сечении. Из прямоугольного треугольника O_1BC получаем

$$r_{\max} = \sqrt{r_0^2 + b^2}\ .$$

Для произвольного x радиус r заготовки составит

$$r = \sqrt{r_0^2 + \frac{x^2 b^2}{l^2}}\ .$$

Рис. 4.27. Схема образования погрешности формы поверхности заготовки при обработке на токарном станке из-за отклонения от параллельности направляющих продольного суппорта относительно оси шпинделя в вертикальной плоскости

Рассмотрим пример. Предположим, что на токарном станке обтачивается заготовка диаметром 50 мм и длиной $l = 500$ мм. Допустим, что отклонение от параллельности направляющих продольного суппорта относительно оси шпинделя в вертикальной плоскости b на этой длине со-

ставляет 0,02 мм. Примем, что радиус заготовки r_0 равен 25 мм. Тогда ее наибольший радиус будет

$$r_{\max} = \sqrt{(25)^2 + (0,02)^2} = 25,000008 \text{ мм.}$$

Таким образом убеждаемся, что геометрическая погрешность этого вида приводит к незначительным погрешностям обработки заготовок, которыми обычно можно пренебречь.

На рис. 4.28 представлена схема формирования отклонения от плоскостности при торцовом фрезеровании, возникающего из-за отклонения от перпендикулярности оси шпинделя вертикально-фрезерного станка относительно плоскости его стола в направлении подачи. В этом случае обработанная поверхность в поперечном сечении заготовки становится вогнутой (эллиптической). Ее отклонение от плоскостности Δ определяется по формуле

$$\Delta = 0,5\left(D_{\text{ф}} - \sqrt{D_{\text{ф}}^2 - B^2}\right)\sin\alpha,$$

где $D_{\text{ф}}$ – диаметр фрезы; B – ширина фрезеруемой поверхности; α – угол наклона оси шпинделя к плоскости стола в направлении подачи. Если принять $\alpha = 10'$, $D_{\text{ф}} = 100$ мм, $B = 80$ мм, то отклонение от плоскостности обработанной торцовым фрезерованием поверхности заготовки составит

$$\Delta = 0,5\left(100 - \sqrt{(100)^2 - (80)^2}\right)0,0029 = 0,058 \text{ мм.}$$

Следовательно, наличие даже небольшой геометрической погрешности данного вида у вертикально-фрезерного станка вызывает существенную погрешность формы обработанной поверхности заготовки.

Рис. 4.28. Схема формирования отклонения от плоскостности при торцовом фрезеровании

В процессе эксплуатации станки изнашиваются и их геометрические погрешности возрастают. Причем при черновой обработке заготовок, ха-

рактеризуемой большими значениями удаляемых припусков и сил резания, износ оказывается в несколько раз большим, чем при их чистовой обработке. Поэтому станки высоких классов точности целесообразно использовать только для чистовой обработки заготовок. Лишь в этом случае станки будут сохранять высокую точность в течение продолжительного времени работы и окупаться.

4.2.1.2. Упругие деформации технологической системы от сил резания

При обработке резанием станок, приспособление, инструмент и заготовка образуют замкнутую упругую систему. Под действием силы резания указанные элементы технологической системы упруго деформируются, что приводит к взаимному отжатию инструмента и заготовки. При обработке каждой заготовки и, тем более, партии заготовок сила резания изменяется в определенных пределах. Это происходит из-за колебаний припуска (глубины резания) вследствие, например, погрешностей размеров, формы и расположения поверхностей поступающих на обработку заготовок, нестабильности механических свойств (твердости) их материала, а также прогрессирующего износа инструмента. Разные силы резания (в сочетании зачастую с переменной жесткостью технологической системы) вызывают разные упругие отжатия инструмента и заготовок и образование погрешностей их обработки.

Упругие перемещения (отжатия) какого-либо элемента технологической системы обычно рассматривают по направлению нормали к обрабатываемой поверхности заготовки. Основное влияние на эти перемещения оказывает составляющая силы резания P_y. Перемещение i-го элемента технологической системы y_i (мм) составляет

$$y_i = \frac{P_y}{J_i},$$

где J_i – жесткость i-го элемента технологической системы (Н/мм). Из этого выражения следует, что жесткость J_i представляет собой отношение силы P_y к перемещению y_i в направлении этой силы.

Чем выше жесткость, тем в меньшей степени реагирует технологическая система на изменение силы резания и тем выше точность и производительность обработки.

Жесткость элементов технологической системы в большинстве случаев определяют экспериментально; жесткость заготовок простых форм и некоторых инструментов можно рассчитать. Жесткость узлов новых станков составляет 20 000…100 000 Н/мм. Жесткость узлов изношенных или разрегулированных станков снижается до 10 000 Н/мм.

Необходимо отметить, что упругие перемещения элементов технологической системы от сил резания происходят за счет собственных деформаций деталей, входящих в эту систему, их контактных деформаций и устранения зазоров. Причем часто, как уже отмечалось, преобладающими могут быть именно контактные деформации.

Для расчетной оценки погрешности обработки, вызываемой упругими деформациями технологической системы от сил резания, рассмотрим схему отжатий инструмента и заготовки при продольном точении. На рис. 4.29, *а* показано положение заготовки, установленной в патроне перед началом обработки; $t_{зад}$ – заданная глубина резания. В процессе резания заготовка отжимается на величину y_1, а инструмент – на величину y_2 (рис. 4.29, *б*). В результате этого глубина резания уменьшается с $t_{зад}$ до значения $t_{фак}$ (фактическая глубина резания). Для отдельного сечения заготовки можно записать

$$y_1 + y_2 = t_{зад} - t_{фак}; \tag{4.1}$$

$$y_1 = \frac{P_y}{J_{заг}};\ y_2 = \frac{P_y}{J_{инс}}, \tag{4.2}$$

где $J_{заг}$ – жесткость системы заготовка–патрон–шпиндельный узел токарного станка; $J_{инс}$ – жесткость системы резец–резцедержатель–продольный суппорт.

Рис. 4.29. Схема отжатий резца и заготовки при продольном точении

Радиальная составляющая силы резания (Н) определяется по формуле

$$P_y = 10 C_p t_{фак}^x S^y V^n K_p,$$

где C_p – постоянная величина; x, y, n – показатели степени при глубине $t_{фак}$, подаче S и скорости резания V; K_p – поправочный коэффициент, учитывающий фактические условия обработки.

Обозначим $10C_pS^yV^nK_p$ через C. Тогда

$$P_y = Ct_{\text{фак}}^x. \tag{4.3}$$

Подставляя (4.3) в (4.2), а затем полученные выражения для y_1 и y_2 в (4.1), получаем

$$\left(\frac{1}{J_{\text{заг}}} + \frac{1}{J_{\text{инс}}}\right)Ct_{\text{фак}}^x + t_{\text{фак}} = t_{\text{зад}}.$$

При дробном показателе x точного решения этого уравнения относительно $t_{\text{фак}}$ нет. Пренебрегая влиянием упругих отжатий инструмента и заготовки на силу резания и обозначая $t_{\text{зад}} - t_{\text{фак}} = t_{\text{ост}}$, получаем следующее приближенное уравнение

$$t_{\text{ост}} = Ct_{\text{зад}}^x\left(\frac{1}{J_{\text{заг}}} + \frac{1}{J_{\text{инс}}}\right). \tag{4.4}$$

Зная разность между наибольшей и наименьшей величинами $t_{\text{зад}}$, которая равна половине допуска на диаметр поступающих на обработку заготовок, с помощью этого уравнения можно определить погрешность диаметра обточенных заготовок как удвоенную разность между наибольшей и наименьшей величинами $t_{\text{ост}}$. Таким образом погрешность диаметра заготовок после точения составит

$$\Delta_y = 2\left(t_{\text{ост}_{\max}} - t_{\text{ост}_{\min}}\right). \tag{4.5}$$

В соответствии с уравнением (4.4) запишем

$$t_{\text{ост}_{\max}} = Ct_{\text{зад}_{\max}}^x\left(\frac{1}{J_{\text{заг}}} + \frac{1}{J_{\text{инс}}}\right);$$

$$t_{\text{ост}_{\min}} = Ct_{\text{зад}_{\min}}^x\left(\frac{1}{J_{\text{заг}}} + \frac{1}{J_{\text{инс}}}\right).$$

Подставляя эти выражения в (4.5), окончательно будем иметь

$$\Delta_y = 2C\left(t_{\text{зад}_{\max}}^x - t_{\text{зад}_{\min}}^x\right)\left(\frac{1}{J_{\text{заг}}} + \frac{1}{J_{\text{инс}}}\right).$$

Найдем численное значение Δ_y. Предположим, что выполняется черновое обтачивание заготовок из стали 45 ($\sigma_{\text{в}} = 668$ МПа) твердосплавным резцом с геометрическими параметрами: $\varphi = 45°$; $\gamma = 10°$; $\lambda = 0°$. Погрешность диаметра заготовок перед черновым обтачиванием – 4 мм. Заданная глубина резания $t_{\text{зад}} = 2\ldots4$ мм, подача $S =$ 0,5 мм/об, скорость резания $V = 100$ м/мин. Жесткость элементов технологической системы

$J_{заг} = J_{инс} = 10000$ Н/мм. Для этих условий обработки коэффициент $C = 370$, показатель степени $x = 0{,}9$. Погрешность диаметра заготовок после чернового обтачивания

$$\Delta_y = 2 \cdot 370\left(4^{0,9} - 2^{0,9}\right)\left(\frac{1}{10000} + \frac{1}{10000}\right) = 0{,}24 \text{ мм.}$$

Теперь предположим, что после чернового выполняется чистовое обтачивание заготовок. Допустим, что погрешность диаметра заготовок перед чистовым обтачиванием составляет 1 мм. Заданная глубина резания $t_{зад}$ изменяется от 0,5 до 1 мм, подача составляет 0,2 мм/об, скорость резания – 150 м/мин. Остальные условия обработки остаются такими же, как и при черновом обтачивании. Для условий чистового обтачивания коэффициент $C = 187$. Погрешность диаметра заготовок после чистового обтачивания составит

$$\Delta_y = 2 \cdot 187\left(1^{0,9} - 0{,}5^{0,9}\right)\left(\frac{1}{10000} + \frac{1}{10000}\right) = 0{,}035 \text{ мм.}$$

Рассмотренные примеры показывают, что при обработке резанием происходит копирование погрешностей поступающих на обработку заготовок. Погрешности обработки заготовок от упругих деформаций технологической системы от сил резания могут достигать значительных величин. Наиболее существенными эти погрешности оказываются при выполнении черновых переходов; при последующих чистовых переходах они могут быть многократно уменьшены.

Вместе с тем при обработке заготовок малой жесткости (даже при их высокой точности перед обработкой) могут возникать значительные погрешности формы, обусловленные их упругими отжатиями под воздействием сил резания. Например, при обтачивании консольно закрепленной в патроне заготовки нежесткого вала (рис. 4.30, *а*) она приобретает форму кубической параболы. Наибольшее отжатие (прогиб) имеет место на правом конце заготовки:

$$y_{заг_{max}} = \frac{P_y l^3}{3EI},$$

где l – вылет заготовки; E – модуль продольной упругости материала заготовки; I – момент инерции ее поперечного сечения. При обтачивании заготовки нежесткого вала, установленного на центры (рис. 4.30, *б*), наибольшее отжатие имеет место посредине заготовки:

$$y_{заг_{max}} = \frac{P_y l^3}{48EI},$$

где l – ее длина. Форма заготовки в этом случае также соответствует форме кубической параболы.

Рис. 4.30. Схемы образования погрешностей формы поверхностей заготовок из-за их прогибов при обтачивании

При обработке маложестких заготовок, погрешности от их упругих отжатий по мере увеличения числа рабочих ходов могут не только не уменьшаться, но и возрастать. На рис. 4.31 показана схема возрастания погрешностей формы заготовки маложесткого вала при круглом шлифовании с постоянной подачей круга на глубину с увеличением числа его рабочих ходов. Заданные по лимбу станка подачи на глубину при первом и втором ходах обозначены $t_{1зад}$ и $t_{2зад}$ ($t_{1зад} = t_{2зад}$), а погрешности формы заготовки после этих ходов – $t_{1ост}$ и $t_{2ост}$. Из-за образования погрешностей формы заготовки после первого хода $t_{1ост}$ второй ход будет выполняться не с $t_{2зад}$, а $t'_{2зад} = t_{2зад} + t_{1ост}$. Это приведет к увеличению силы P_y (по сравнению с ее значением при первом ходе) и погрешности формы заготовки до $t_{2ост} > t_{1ост}$. Таким образом, по мере увеличения числа рабочих ходов шлифовального круга погрешности формы заготовки будут нарастать. Для уменьшения погрешности формы заготовки в этом случае

необходимо снижать подачу на глубину при каждом следующем ходе по сравнению с ее значением на предыдущем ходе на величину, превышающую прогиб заготовки при его выполнении.

Рис. 4.31. Схема увеличения погрешности формы заготовки вала при круглом шлифовании с постоянной подачей круга на глубину

Рис. 4.32. Схема отжатий элементов технологической системы при обтачивании заготовки вала

Во многих случаях упругие отжатия элементов технологической системы зависят от их взаимного расположения, которое изменяется в процессе обработки. На рис. 4.32 схематично показаны упругие отжатия элементов технологической системы при обтачивании заготовки вала, установленной на центры. Когда резец находится в крайнем правом положении, сила P_y целиком воспринимается центром задней бабки и он имеет наибольшее отжатие $y_{\text{зб}_{\max}}$. При этом отжатия центра передней бабки и заготовки равны нулю. При перемещении резца влево отжатие центра задней бабки уменьшается, а отжатие центра передней бабки возрастает и достигает наибольшего значения $y_{\text{пб}_{\max}}$ в крайнем левом положении резца. В этом положении сила P_y полностью воспринимается центром передней бабки и отжатия центра задней бабки и заготовки равны нулю. Как отмечалось выше, наибольшее отжатие заготовки $y_{\text{заг}_{\max}}$ имеет место тогда, когда резец находится посредине заготовки. Отжатия инструмента с суппортом $y_{\text{инс}}$ при обработке не изменяются.

Так как упругие отжатия элементов технологической системы (за исключением инструмента) оказываются переменными по длине обработки, то это обуславливает образование не только погрешностей диаметра, но и погрешностей формы обработанной поверхности заготовок. Причем форма этой поверхности зависит от соотношений между упругими отжатиями (жесткостью) элементов технологической системы. Если, например, жесткость заготовки существенно превышает жесткость центров, то ее образующая оказывается вогнутой. При обратном соотношении жесткостей она становится выпуклой (рис. 4.30, *б*).

В целом, погрешности обработки заготовок, обусловленные упругими деформациями технологической системы от сил резания, могут составлять от 20 до 80 % от суммарной погрешности.

Для снижения этих погрешностей необходимо, прежде всего, повышать жесткость технологической системы, что может быть достигнуто:

- применением дополнительных опор для заготовок и инструментов (люнетов, кондукторных втулок и т. п.);
- фиксацией неподвижных (при обработке) узлов станка на направляющих;
- созданием натягов в подшипниках качения шпиндельных узлов;
- уменьшением числа стыков деталей в приспособлениях для установки заготовок и инструмента.

Другим путем сокращения рассматриваемых погрешностей обработки заготовок является использование на станках систем автоматического управления. Управляя подачей по мере изменения припуска на обработку

и твердости заготовок, такие системы позволяют стабилизировать силу резания и упругие отжатия в технологической системе.

Блок-схема системы автоматического управления подачей на вертикально-фрезерном станке, разработанной под руководством проф. Б.С. Балакшина, показана на рис. 4.33. Датчик Д измеряет силу P_x, действующую по нормали к фрезеруемой плоскости. Электрический сигнал от датчика через усилитель попадает в сравнивающее устройство СС, в котором он сопоставляется с сигналом задающего устройства ЗУ, соответствующим установленной заранее величине $P_{x_{зад}}$. Сигнал рассогласования из сравнивающего устройства поступает в регулирующее устройство РО, которое управляет числом оборотов электродвигателя постоянного тока, осуществляющего подачу. Таким образом, если $P_x > P_{x_{зад}}$, то подача уменьшается, если $P_x < P_{x_{зад}}$, то она возрастает.

Рис. 4.33. Блок-схема системы автоматического управления подачей на вертикально-фрезерном станке

Использование систем автоматического управления подачей на металлорежущих станках позволяет в несколько раз снизить погрешности от упругих деформаций технологической системы от сил резания и одновременно существенно увеличить производительность обработки заготовок. Основным недостатком таких систем является переменная шероховатость обработанной поверхности, поэтому их использование при окончательной обработке заготовок оказывается недопустимым.

Для снижения погрешностей от упругих деформаций технологической системы от сил резания обработку с переменной подачей можно осуществлять и на обычных станках, особенно на станках с ЧПУ. Например, на токарных станках точение с переменной подачей позволяет уменьшить погрешности формы заготовок нежестких валов.

На станках с ЧПУ погрешности от упругих деформаций технологической системы от сил резания можно снизить также путем предискажения траектории перемещения режущего инструмента.

Значительно сократить погрешности рассматриваемого вида можно, используя бесцентровые методы обработки (бесцентровое точение, бесцентровое шлифование и т. п.). При этих методах даже при очень низкой жесткости заготовок может быть достигнута высокая точность обработки. Так, бесцентровое шлифование прутков обеспечивает точность их диаметра, соответствующую $IT\,5–IT\,6$.

4.2.1.3. Износ режущего инструмента

При обработке резанием неизбежен износ режущего инструмента. При чистовой обработке износ происходит по его задней поверхности (рис. 4.34, *а*), что постепенно отдаляет режущую кромку от заготовки. Следствием этого является образование погрешностей размеров и формы обработанных поверхностей заготовок.

Размерный износ инструментов определяют по нормали к обработанной поверхности. Характерная зависимость размерного износа инструмента от пути резания показана на рис. 4.34, *б*. На участке l_1 (участок начального износа) износ более интенсивен, чем на участке l_2 нормального износа, который является практически прямолинейным. На участке l_3 (участок катастрофического износа) износ наиболее интенсивен и быстро приводит к разрушению режущего инструмента.

Рис. 4.34. К расчету размерного износа инструмента

Интенсивность размерного износа (скорость износа) на участке нормального износа характеризуется отношением

$$И_0 = \frac{И_2}{l_2},$$

где $И_2$ – размерный износ (мкм), приобретенный инструментом на пути l_2 (м). Для расчета размерного износа инструмента общую кривую износа заменяют прямой *аа*. Она отсекает на оси ординат отрезок $И_н$. Эту величину называют начальным износом и выражают в мкм. Зная величины $И_0$ и $И_н$, можно найти размерный износ $И$ (мкм) на пути резания L (м) из соотношения:

$$И = И_н + И_0 L.$$

При точении длина пути резания L (м) составляет

$$L = \frac{\pi D l}{1000 S},$$

где D, l – соответственно диаметр и длина обрабатываемой поверхности заготовки, мм; S – подача, мм/об.

При строгании длина пути резания L (м) определяется по формуле:

$$L = \frac{lB}{1000 S},$$

где l, B – соответственно длина и ширина заготовки, мм; S – подача, мм/дв.х.

Таким образом, при точении размерный износ инструмента:

$$И = И_н + И_0 \frac{\pi D l}{1000 S};$$

при строгании:

$$И = И_н + И_0 \frac{lB}{1000 S}.$$

Интенсивность износа $И_0$ зависит от метода обработки, материалов заготовки и режущего инструмента, его геометрических параметров и режимов резания (скорости резания и подачи). Глубина резания слабо влияет на интенсивность износа.

Некоторые данные по стойкости и интенсивности износа $И_0$ резцов при чистовом точении и растачивании заготовок из различных материалов приведены в табл. 4.4.

Начальный износ $И_н$ твердосплавных резцов при чистовом течении и растачивании заготовок из углеродистых и легированных сталей и серого чугуна составляет 2....10 мкм.

При обработке крупных заготовок размерный износ приводит к погрешностям формы их поверхностей. При обработке небольших заготовок погрешности формы их поверхностей обычно малы. Размерный износ в этом случае проявляется в непрерывном увеличении или уменьшении размеров заготовок в партии.

Таблица 4.4

Режимы чистового точения и растачивания, стойкость резцов (при $Rz = 10$ мкм) и интенсивность их износа (по данным А.А. Маталина)

Обрабатываемый материал	Материал инструмента	Режимы резания			Стойкость в метрах пути резания	Интенсивность износа, мкм/км
		Скорость резания V, м/мин	Подача S, мм/об	Глубина резания t, мм		
Стали углеродистые конструкционные качественные	Т30К4 Эльбор	100...180 550...600	0,04...0,08 0,04...0,06	0,1…0,3	12500 25000	6,5 3,0
Стали конструкционные легированные	Т30К4 Эльбор	120...180 450...500	0,04...0,08 0,04...0,06	0,1…0,3	20000	4,7
Стали высоколегированные коррозионностойкие, жаростойкие и жаропрочные	Т30К4 Эльбор	80...120 200...220	0,02...0,04	0,1…0,2	11000 15500	6,5 3,0
Стальное литье	Т30К4 Эльбор	100...160 200...230	0,04...0,06	0,1…0,3	7000 12500	8,5 7,0
Стали конструкционные улучшенные ($HRC_Э$ 26-30)	Т30К4 Эльбор	120...180 350...400	0,04...0,08 0,04...0,06	0,1…0,3	8000 15000	8,5 4,5
Стали конструкционные закаленные ($HRC_Э$ 40-50)	Т30К4 Эльбор	70...150 300...350	0,02...0,05 0,02...0,04	0,1…0,2	7000 21000	10 5,0
Чугун серый	ВК3М	80...160	0,04...0,08	0,1…0,3	18000	5,2

Предположим, что производится чистовое обтачивание заготовки из стали 45 с наружным диаметром $D = 200$ мм и длиной $l = 400$ мм. Обработка ведется резцом из твердого сплава Т30К4 при скорости резания $V = 150$ м/мин и подаче $S =$ 0,06 мм/об. Из таблицы 4.4 находим, что $И_0$ = 6,5 мкм/км = 0,0065 мкм/м. Начальный износ $И_н$ примем равным 5 мкм. Размерный износ резца при обработке заготовки составит

$$И = 5 + 0,0065\frac{3,14 \cdot 200 \cdot 400}{1000 \cdot 0,06} \approx 32 \text{ мкм}$$

и приведет к конусности обработанной поверхности, равной $И$.

Теперь предположим, что при таких же условиях обтачивается партия небольших заготовок из стали 45. Диаметр обтачиваемой поверхности $D =$ 30 мм, длина $l =$ 40 мм. Объем партии $n =$ 100 шт. Определим увеличение диаметра последней заготовки, полагая, что вся партия заготовок обрабатывается без поднастройки инструмента. В этом случае размерный износ инструмента составит:

$$И = 5 + 0,0065\frac{3,14 \cdot 30 \cdot 40 \cdot 100}{1000 \cdot 0,06} \approx 46 \text{ мкм.}$$

Диаметр последней заготовки возрастет на $2И = 92$ мкм.

Для снижения погрешностей обработки от размерного износа лезвийного режущего инструмента необходимо:

- повышать качество инструмента путем использования эффективных методов его затачивания, нанесения износостойких покрытий, применения других методов упрочнения;
- оптимизировать режимы резания и геометрию инструмента;
- использовать высокоэффективные СОТС и способы их доставки в зону резания.

Значительно снизить рассматриваемые погрешности обработки позволяет периодическая поднастройка режущего инструмента.

При обтачивании, растачивании и строгании размерный износ и соответствующие погрешности обработки можно существенно уменьшить, используя резцы с широкой вспомогательной режущей кромкой (типа резцов В.А. Колесова). Такие резцы работают с большими подачами, что сокращает путь резания, а значит, и их размерный износ.

При шлифовании влияние размерного износа круга на погрешности обрабатываемой заготовки компенсируют обычно его периодической правкой. Интенсивность износа круга зависит от его диаметра. Круги большого диаметра, применяемые при круглом наружном шлифовании, изнашиваются медленнее, чем круги, используемые при внутреннем шлифовании.

Если при круглом наружном шлифовании круг правят через 15…20 мин, то, например, на внутришлифовальных автоматах его правят

при обработке каждой заготовки. В ряде случаев правку круга осуществляют непрерывно. Высокая точность обработки при этом обеспечивается за счет применения средств активного контроля.

4.2.1.4. Температурные деформации технологической системы

В процессе обработки резанием элементы технологической системы нагреваются. Основным источником тепла является механическая работа, затрачиваемая на процесс резания, и работа, расходуемая на преодоление сил трения, возникающих на контактах движущихся деталей станка. К этому добавляется тепло, выделяющееся в гидравлических и электрических системах станка, а также тепло, поступающее от внешних источников (поблизости расположенных станков, нагревательных устройств и т. д.) В результате нагрева элементы технологической системы упруго деформируются, что нарушает правильность их положения и движения и приводит к образованию погрешностей обработки заготовок, которые могут достигать 30…40 % от суммарной погрешности.

Температурные деформации станка. Нагрев станка происходит от всех указанных источников тепла и является неравномерным.

Температура в различных точках станины может изменяться в пределах 10 °С и более. В этих условиях станины упруго деформируются и теряют правильную форму, что нарушает точность расположения смонтированных на ней основных частей станка.

Одним из основных источников тепла в станке является шпиндельная бабка. Температура в различных точках корпуса бабки изменяется в пределах 10…50 °С. Наиболее высокая температура наблюдается в местах расположения подшипников шпинделя и быстроходных валов. Температура шпинделя и валов оказывается на 30…40 % выше средней температуры корпуса бабки. Нагрев шпиндельной бабки влечет за собой изменение положения шпинделя. Например, шпиндель токарного станка может смещаться в горизонтальной и вертикальной плоскостях на несколько сотых долей мм. Существенными могут быть и осевые температурные деформации шпинделя. Если фиксация шпинделя токарного станка от осевого перемещения осуществлена у заднего подшипника, то при длине шпинделя L и разности температур между ним и корпусом Δt осевое перемещение шпинделя составит:

$$\Delta L = \alpha L \Delta t,$$

где α – коэффициент линейного расширения материала шпинделя. Приняв $L = 800$ мм, $\Delta t = 10°$ С, $\alpha = 0{,}000012$ 1/°С, получим $\Delta l = 0{,}1$ мм, т. е. смещение переднего конца шпинделя оказывается существенным и может вызвать заметные погрешности обработки заготовок, если это смещение не компенсировать периодической поднастройкой инструмента.

Значительные температурные деформации могут претерпевать винты подачи. В результате этих деформаций появляются погрешности шага винтов и погрешности обработки заготовок, которые могут достигать 0,03…0,05 мм.

а

б

Рис. 4.35. Зависимости температурных смещений конца шпинделя токарного станка от времени нагрева (работы) и охлаждения [3]: а – в вертикальной плоскости; б – в горизонтальной плоскости

Нагрев станка и его охлаждение после прекращения работы происходит постепенно. На рис. 4.35 приведены зависимости температурных смещений конца шпинделя токарного станка от времени работы и последующего охлаждения. Из него видно, что наступление момента теплового равновесия станка (когда приток тепла от всех источников равен его оттоку в окружающую среду) происходит только после 5 часов работы.

Смещение конца шпинделя при этом в вертикальной плоскости достигает 0,048 мм, а в горизонтальной – 0,011 мм. Охлаждение станка идет значительно медленнее, чем нагрев.

Уменьшения температурных деформаций станков и соответствующих погрешностей обработки добиваются следующим образом:

- созданием наиболее симметричных конструкций станков, исключающих температурные деформации изгиба;
- использованием принудительного охлаждения отдельных частей станков (шпинделей, ходовых винтов);
- применением материала с малым коэффициентом линейного расширения (например, станины высокоточных станков выполняют из гранита);
- оснащением станков с ЧПУ системами автоматической компенсации температурных деформаций шпиндельных бабок путем оперативного изменения управляющей программы;
- размещением высокоточных станков в термоконстантных помещениях, в которых температура поддерживается в пределах 20±0,5 °С;
- предварительным разогревом станка на холостом режиме, после чего его температурные деформации не претерпевают существенных изменений.

Температурные деформации заготовок. Нагрев заготовок происходит за счет тепла, выделяющегося в зоне резания. В большинстве случаев (при точении, фрезеровании, строгании, наружном протягивании) основная часть этого тепла аккумулируется в стружке. При сверлении большая часть тепла остается в заготовке.

При токарной обработке в стружку уходит 50…85 % тепла, а при высоких скоростях резания свыше 90 %; 10…40 % тепла переходит в резец; 3…9 % остается в заготовке и около 1 % рассеивается в окружающую среду. При сверлении в стружку уходит 28 % тепла; 14 % переходит в сверло; 55 % остается в заготовке и 3 % рассеивается в окружающую среду.

Температурные деформации заготовок приводят к образованию погрешностей размеров, формы и расположения их поверхностей.

Предположим, что последовательно выполняется сверление и развертывание сквозного отверстия диаметром $d = 20$ мм в заготовке из серого чугуна толщиной 30 мм. Допустим, что температура заготовки после сверления повысилась до 100 °С. Найдем, насколько уменьшится диаметр развернутого отверстия после охлаждения заготовки до 20 °С. Не учитывая нагрева заготовки и развертки при развертывании, получим:

$$\Delta d = \alpha \Delta t d = 0{,}00001 \cdot 80 \cdot 20 = 0{,}016 \text{ (мм)}.$$

Найденная величина является существенной, так как составляет значительную часть допуска диаметра отверстия при развертывании. Необходимо отметить, что температурную деформацию заготовок после сверления трудно компенсировать увеличением диаметра развертки, так как эта деформация носит случайный характер. Она изменяется из-за колебаний твердости заготовок в партии и их теплофизических свойств, а также из-за износа сверла.

Во многих случаях температурные деформации заготовки изменяются по длине обработки. На рис. 4.36 показано температурное поле в заготовке при продольном течении и форма ее поверхности после обработки (охлаждении до температуры окружающей среды). В процессе обработки наблюдается три периода распространения тепла и образования температурных деформаций заготовки. Первый период (когда резец находится у правого торца) характеризуется небольшим нагревом заготовки, так как металл перед резцом холодный. Второй (установившийся) период характерен тем, что температурные деформации возрастают до определенного уровня и далее остаются постоянными на большей части длины заготовки. Сзади резца устанавливается постоянное температурное поле. Третий период (когда резец приближается к левому торцу) характерен повышением температуры заготовки из-за отражения тепловой волны от этого торца. Температурные деформации в этот период возрастают. Таким образом, вследствие переменности температурных деформаций с разных участков заготовки удаляется различный припуск (наименьший у правого и наибольший у левого торца), что и обуславливает образование погрешности формы заготовки после обработки.

Рис. 4.36. Температурное поле (а) и форма поверхности заготовки после обработки (б) [9]

Наиболее существенными погрешности от температурных деформаций оказываются у тонкостенных заготовок, с которых удаляются большие припуски. Особенно значительны эти погрешности при односторонней обработке тонкостенных заготовок большой длины (планки, рейки и т. д.) Для массивных заготовок погрешности от их температурных деформаций обычно невелики, и ими часто можно пренебречь.

Для снижения температурных деформаций заготовки и обусловленных ими погрешностей обработки необходимо:

- использовать эффективное охлаждение обрабатываемых заготовок;
- повышать скорость резания, что обеспечивает снижение поступающей в заготовку доли тепла;
- предусматривать перед выполнением чистовых переходов охлаждение заготовки, нагретой при осуществлении черновых переходов (например, на обрабатывающем центре после сверления отверстия относительно большого диаметра целесообразно выполнить обработку мелких крепежных отверстий, во время которой заготовка остынет, а затем уже осуществить чистовую обработку отверстия большого диаметра);
- использовать рациональные схемы установки заготовок (например, при обработке в центрах заготовок длинных нежестких валов для исключения их продольного изгиба при нагреве предусматривать применение подпружиненного заднего центра).

Температурные деформации режущего инструмента. При обработке резанием инструмент подвержен интенсивному нагреву и существенным температурным деформациям, обуславливающим образование погрешностей обработки заготовок. Так, температура на рабочей поверхности твердосплавных резцов достигает 900…950 °С. Хотя температура державки резцов оказывается намного меньше этих значений, резцы испытывают значительные температурные деформации (удлинения).

Характерная зависимость температурного удлинения резца от времени его непрерывной работы показана на рис. 4.37, *а*. Удлинение резца ΔL_p возрастает до момента теплового равновесия, который при чистовой обработке наступает ориентировочно через 10…20 мин. При указанной обработке без искусственного охлаждения температурные удлинения твердосплавных резцов при тепловом равновесии $\Delta L_{\text{рт}}$ составляют 0,03…0,05 мм. Установлено, что удлинения резцов $\Delta L_{\text{рт}}$ растут с увеличением подачи, глубины и скорости резания, а также твердости материала заготовки и вылета резцов $L_{\text{р}}$ и уменьшаются с увеличением площади поперечного сечения державки.

Для состояния теплового равновесия удлинение резцов с пластинкой из твердого сплава можно определять по эмпирической формуле:

$$\Delta L_{\text{рт}} = C\frac{L_{\text{р}}}{F}\sigma_{\text{в}}(tS)^{0,75}V^{0,5},$$

где C – постоянная (при глубине резания t < 1,5 мм, подаче S < 0,2 мм/об, скорости резания $V = 100…200$ м/мин, постоянная $C = 0,45$); $L_{\text{р}}$ – вылет резца, мм; F – площадь поперечного сечения державки резца, мм^2, $\sigma_{\text{в}}$ – предел прочности материала заготовки, МПа.

Рис. 4.37. Зависимости удлинения резца от времени непрерывной работы (а) и при обработке партии заготовок (б)

Изменение длины резца при обработке партии заготовок показано на рис. 4.37, *б*. Во время перерывов в работе продолжительностью t, t_1, t_2 резец охлаждается. Если работа протекает ритмично, то перерывы t одинаковы и изменение удлинений резца при обработке всех заготовок постоянно. При отсутствии ритмичности ($t \neq t_1$, $t_1 \neq t_2$) это удлинение становится больше, что ведет к увеличению погрешностей размеров в партии заготовок.

При обработке крупных заготовок температурные деформации резца могут вызвать образование погрешности формы обрабатываемой поверхности. При обработке заготовок небольших размеров эти деформации могут порождать погрешности размеров обрабатываемой поверхности.

Для снижения погрешностей обработки заготовок от температурных деформаций режущего инструмента нужно:

- использовать его эффективное охлаждение;
- исключать длительные перерывы в работе;
- уменьшать вылет инструментов.

4.2.1.5. Деформации заготовок от остаточных напряжений

Как отмечалось, остаточные напряжения в заготовках возникают после литья, горячей и холодной обработки давлением, сварки, термической, химико-термической, механической и других видов обработки, а также нанесения покрытий. Остаточные напряжения всегда уравновешиваются по сечению заготовки и внешне обычно никак не проявляются. Эти напряжения могут вызывать значительные деформации заготовок и приводить к погрешностям размеров, формы и расположения их поверхностей.

Деформирование заготовок от остаточных напряжений происходит в следующих ситуациях.

1. При снятии припуска с заготовок, имеющих остаточные напряжения, равновесие последних нарушается, и после раскрепления заготовки деформируются до наступления нового равновесного состояния оставшихся в них остаточных напряжений. Чем выше уровень остаточных напряжений в заготовках и больше припуск, тем больше деформации заготовок.

2. При хранении заготовок с остаточными напряжениями или при их нагреве может происходить релаксация (снижение) этих напряжений, при которой упругие деформации превращаются в пластические. Интенсивность снижения остаточных напряжений зависит от их величины и знака, а также релаксационной стойкости материала заготовок и в разных их местах, как правило, оказывается различной. Это нарушает равновесие остаточных напряжений и вызывает деформации заготовок.

3. Возникающие непосредственно при обработке резанием и другими методами остаточные напряжения также вызывают деформации заготовок после их раскрепления. Наиболее существенными эти деформации оказываются для маложестких заготовок несимметричного профиля, с противоположных сторон которых снимаются разные припуски. Например, значительные деформации от остаточных напряжений наблюдаются при фрезеровании концевыми фрезами протяженных заготовок коробчатой формы.

Для примера рассмотрим формирование остаточных напряжений в заготовке типа бруса при правке пластическим изгибом, а также образование деформаций бруса при его последующей обработке резанием. Предположим, что брус прямоугольного поперечного сечения правится по схеме, показанной на рис. 4.38, *а*. При этом брус на длине l подвергается чистому изгибу. Допустим, что материал бруса не имеет упрочнения, его предел текучести составляет $\sigma_т$, а пластические деформации при правке распространяются на все поперечное сечение бруса. Эпюра напряжений $\sigma_{пл}$ при пластическом изгибе бруса моментом M для этого случая приведена на рис. 4.38, *б*. Освобождение бруса от нагрузки (момента M) эквивалентно приложению к нему равного по величине момента противоположного знака, т. е. $M' = -M$. Эпюра упругих напряжений $\sigma_у$ в брусе от этого момента показана на рис. 4.38, *в*. (Значения $\sigma_у$ в крайних волокнах бруса определены из условия равенства по абсолютной величине моментов M и M'.) Остаточные напряжения в брусе $\sigma_{ост}$ (рис. 4.38, *г*) будут равны алгебраической сумме напряжений при пластическом изгибе (рис. 4.38, *б*) и упругих напряжений при освобождении от нагрузки (рис. 4.38, *в*).

Рис. 4.38. Схема правки бруса (а) и эпюры напряжений: при его пластическом изгибе (б), освобождении от нагрузки (в) и остаточных (г)

Наибольшая величина упругих напряжений в брусе при освобождении от нагрузки оказалась равной $1{,}5\sigma_т$ (рис. 4.38, *в*). Конечно, таких напряжений в брусе в действительности не возникает, так как после устранения нагрузки сразу идет формирование остаточных напряжений. Но описанное постадийное рассмотрение процесса упруго-пластического деформирования бруса позволяет рассчитать остаточные напряжения и широко используются в инженерной практике.

Как видно из рис. 4.38, *г*, после правки в брусе образуются значительные остаточные напряжения, величины которых в крайних волокнах составляют $0{,}5\sigma_т$. Эпюра остаточных напряжений является уравновешенной, т. е. равнодействующие усилия и моменты равны нулю.

Если теперь брус подвергнуть, например, односторонней обработке резанием, то равновесие остаточных напряжений нарушится и брус после раскрепления упруго деформируется (прогнется), т. е. обретет погрешность формы.

Для того чтобы представить, к каким по величине деформациям бруса это приведет, рассмотрим численный пример.

Пусть размеры бруса, подвергаемого правке, составляют: длина $L =$ 500 мм; ширина $b =$ 40 мм; высота $h = 20$ мм. Материал бруса – сталь с $\sigma_т =$ 400 МПа и модулем продольной упругости $E = 2 \cdot 10^5$ МПа. Будем считать брус после правки прямолинейным. Эпюра остаточных напряжений в брусе после правки соответствует показанной на рис. 4.38, *г*. Предположим, что с верхней плоскости бруса торцовым фрезерованием снимается припуск $Z =$ 1 мм (рис. 4.39, *а*). Для простоты примем, что растягивающие остаточные напряжения постоянны как в пределах припуска, так и по длине бруса и составляют $\sigma_{ост} = 0{,}5\sigma_т =$ 200 МПа. Снятие припуска Z эквивалентно приложению к брусу высотой h_1 момента M (рис. 4.39, *б*), величина которого составляет

$$M = \sigma_{ост} bZ \frac{h_1}{2} = 200 \cdot 40 \cdot 1 \cdot \frac{19}{2} = 76000 \text{ Н·мм}.$$

Прогиб бруса, подвергаемого чистому изгибу, найдем по формуле

$$f = \frac{ML^2}{8EI},$$

где $I = \dfrac{bh_1^3}{12}$ – момент инерции сечения бруса.

Для рассматриваемого случая получим

$$I = \frac{40(19)^3}{12} = 22863 \text{ мм}^4;$$

$$f = \frac{76000(500)^2}{8 \cdot 2 \cdot 10^5 \cdot 22863} = 0{,}52 \text{ мм}.$$

Таким образом, видим, что деформация бруса в результате удаления даже сравнительно небольшого припуска оказывается очень значительной.

Рис. 4.39. Схема торцового фрезерования бруса после правки (а) и его прогиб после раскрепления (б)

В общем случае при обработке резанием деформации заготовок могут происходить как за счет перераспределения имевшихся в них остаточных напряжений, так и за счет остаточных напряжений, вызываемых процессом резания. В этом случае картина образования погрешностей обработки заготовок от остаточных напряжений существенно усложняется.

Очевидно, что для уменьшения погрешностей обработки, обусловленных воздействием остаточных напряжений, необходимо добиваться снижения этих напряжений как при получении исходных заготовок, так и при их последующей обработке.

Радикальным методом подавления остаточных напряжений является отжиг заготовок, который практически ликвидирует эти напряжения. При необходимости исключения окисления заготовок отжиг выполняют в вакууме или нейтральной среде. При изготовлении высокоточных деталей отжиг их заготовок может выполняться неоднократно – его чередуют с операциями обработки резанием. Снятие остаточных напряжений путем отжига объясняется тем, что предел текучести металла при высоких температурах резко падает. При этом начинается пластическое течение и остаточные напряжения снижаются до предела текучести.

Для уменьшения остаточных напряжений в крупных отливках из-за отсутствия печей больших размеров используют естественное старение. Оно заключается в длительном хранении (вылеживании) заготовок на воздухе. Продолжительность вылеживания нередко составляет от 6 до 12 месяцев. Установлено, что при естественном старении отливок из серого чугуна остаточные напряжения в среднем снижаются только на 5…20 %, но при этом резко уменьшается концентрация остаточных напряжений у графитовых включений и практически прекращается самопроизвольное деформирование отливок с течением времени.

Естественному старению, в частности, подвергают отливки станин металлообрабатывающих станков. Перед естественным старением выполняют черновую обработку станин. При этой обработке со станины снимаются относительно большие припуски, и после нее могут иметь место значительные деформации станины из-за перераспределения остаточных напряжений. При чистовой обработке станин, выполняемой после естественного старения, удаляются намного меньшие припуски, чем при черновой обработке. Деформации станин от перераспределения остаточных напряжений, которые при естественном старении к тому же несколько уменьшаются, уже оказываются незначительными, что позволяет обеспечить высокую точность станин.

Наряду с отжигом и естественным старением для снижения остаточных напряжений в отливках применяют вибрационную обработку. Ее

осуществляют на специальных стендах или с помощью переносных вибраторов, закрепляемых на отливках.

При вибрационной обработке чугунных отливок в них происходят процессы, подобные тем, которые имеют место при естественном старении. В результате такой обработки, которая осуществляется намного быстрее естественного старения, в основном снижается концентрация остаточных напряжений около графитовых включений, что обеспечивает стабилизацию размеров, формы и расположения поверхностей отливок. Вместе с тем применять вибрационную обработку следует с должной осторожностью, так как при больших остаточных напряжениях она может привести к образованию трещин и разрушению отливок.

Для уменьшения остаточных напряжений в стальных заготовках после закалки служит их последующий отпуск. В ряде случаев отпуск маложестких заготовок типа пластин, дисков и т. п. выполняют в заневоленном состоянии, что позволяет снизить их деформации, возникшие при закалке.

Остаточные напряжения в заготовках простой формы могут быть устранены путем их равномерной пластической деформации, величина которой не превышает 1…2 %. Например, остаточные напряжения в заготовках типа стержней снимают пластическим растяжением, а в заготовках типа тонкостенных втулок – пластической раздачей с помощью специальных разжимных оправок.

Снижения остаточных напряжений и деформаций заготовок, формирующихся при обработке резанием, можно добиться оптимизацией режимов и условий обработки.

4.2.1.6. Погрешности изготовления мерного режущего инструмента и теоретической схемы обработки

Погрешность изготовления мерного режущего инструмента. Погрешности обработки вызываются погрешностями изготовления мерных режущих инструментов. К таким инструментам относятся: резьбовые, канавочные и фасонные резцы, метчики, плашки, сверла, зенкеры, развертки, протяжки, шпоночные и фасонные фрезы, профильные абразивные круги и др.

Например, диаметр режущей части спиральных сверл, контролируемый в начале рабочей части, выполняют в зависимости от класса их точности с полями допусков $h8$ и $h9$. Ясно, что поле рассеивания диаметра просверленных отверстий в партии заготовок не может быть меньше этих допусков.

Спиральные сверла, как правило, имеют на рабочей части уменьшение диаметра по направлению к хвостовику (обратная конусность) в пре-

делах 0,02…0,08 на 100 мм длины. Из-за этого при перетачивании сверл их диаметр уменьшается, что увеличивает поле его рассеивания и поле рассеивания диаметра просверленных отверстий.

Отклонения от симметричности сердцевины сверла относительно оси его рабочей части, радиальное биение по ленточкам и биение режущих кромок относительно этой оси приводят к появлению при сверлении неуравновешенной радиальной силы и разбивке отверстий (превышению их диаметра над диаметром сверла), а также их уводу. Разбивка и увод отверстий при использовании разных сверл данного типоразмера оказываются различными. При этом разная разбивка обуславливает увеличение поля рассеивания диаметра просверленных отверстий.

Таким образом, целый ряд погрешностей изготовления спиральных сверл прямо или косвенно переносится на погрешности обработанных отверстий.

Для снижения погрешностей обработки данного вида необходимо повышать точность изготовления мерных режущих инструментов, а также точность их перетачивания. Наряду с этим погрешности обработки, вызываемые погрешностями изготовления инструментов, можно уменьшить технологическими методами.

Так, значительно снизить разбивку и увод отверстий при сверлении спиральными сверлами можно за счет применения кондукторных втулок. Другим путем уменьшения разбивки и увода отверстий является предварительная зацентровка отверстий, выполняемая жесткими центровочными сверлами.

Рис. 4.40. Схемы фрезерования шпоночных пазов маятниковым (а) и рамочным (б) способами

На рис. 4.40, *а* показана схема фрезерования шпоночного паза концевой шпоночной фрезой так называемым маятниковым способом (заглубление фрезы перед каждым продольным ходом составляет 0,1…0,3 мм). При таком способе обработки, который выполняют с полем

допуска $e8$, погрешность диаметра фрез полностью переносится на погрешность ширины паза. Этого можно избежать и, тем самым, значительно снизить погрешность ширины паза, если его фрезерование выполнять так называемым рамочным способом (рис. 4.40, *б*), при котором противоположные стороны паза фрезеруются раздельно.

Погрешность теоретической схемы обработки. Этот вид погрешности обработки возникает из-за упрощения ее кинематической схемы или профиля фасонного инструмента. Такие погрешности, например, имеют место при нарезании зубчатых колес модульными фрезами (рис. 4.41). Теоретически для каждого колеса с данным модулем и числом зубьев необходимо иметь свою фрезу. Однако для нарезания колес с данным модулем m выпускаются наборы, состоящие из 8 (при $m \leq 8$ мм) и 15 (при $m > 8$ мм) фрез. Таким образом, на практике колеса с числом зубьев, находящимся в определенном интервале, нарезаются одной фрезой, что приводит к некоторой погрешности профиля зубьев.

Рис. 4.41. Схема нарезания зубьев дисковой модульной фрезой: 1 – фреза; 2 – заготовка зубчатого колеса

4.2.1.7. Погрешность установки заготовок

Под *погрешностью установки* понимается отклонение положения заготовки на станке от требуемого. Например, требуемым для заготовок вала на токарном станке является положение, при котором их ось совпадает с осью шпинделя станка. В действительности всегда имеет место то или иное отклонение положения заготовок от требуемого, которое прямо или косвенно переносится на погрешности их обработки.

Погрешность установки заготовок складывается из погрешности базирования, погрешности закрепления и погрешности приспособления, используемого для их установки.

Погрешность базирования. *Погрешностью базирования* называется отклонение фактически достигнутого положения заготовки при базировании от требуемого. Эту погрешность можно рассматривать как отклонение технологических баз от установочных элементов приспособления, возникшее при базировании. Причем это отклонение определяется как максимально возможное для партии заготовок.

Рассмотрим примеры установки заготовок, при которой имеют место погрешности базирования.

На рис. 4.42 приведена схема установки корпуса. Технологическими базами корпуса являются нижняя плоскость и два перпендикулярных ей отверстия, обычно обработанных с точностью не ниже *IT*7. Левым отверстием корпус устанавливается на цилиндрический палец приспособления, а правым – на срезанный. Отметим, что такая схема установки, благодаря своей простоте, широко используется на практике.

Рис. 4.42. Схема установки корпуса на плоскость и два отверстия

Из-за зазоров между пальцами и отверстиями *I* и *II* возможно отклонение оси левого отверстия от оси цилиндрического пальца на величину

$$e = \frac{S_г}{2} + \frac{Td_о}{2} + \frac{Td_п}{2},$$

где $S_г$ – гарантированный зазор между пальцем и отверстием; $Td_о$, $Td_п$ – соответственно допуски диаметров отверстия *I* и цилиндрического пальца. Удвоенное значение величины e и будет представлять собой погрешность базирования корпуса в направлениях осей X ($\varepsilon_{бx}$) и Y ($\varepsilon_{бy}$), т. е.

$$\varepsilon_{бx} = \varepsilon_{бy} = 2e = S_г + Td_о + Td_п.$$

Наряду с погрешностями базирования $\varepsilon_{бx}$ и $\varepsilon_{бy}$ при рассматриваемой схеме установки возможен перекос корпуса в плоскости XOY (рис. 4.43). Угол перекоса α определяется выражением

$$\operatorname{tg}\alpha = \frac{S_{1\max} + S_{2\max}}{2A_{\text{о}}},$$

где $S_{1\max}$, $S_{2\max}$ – максимально возможные зазоры в сопряжениях соответственно цилиндрического и срезанного пальцев с отверстиями *I* и *II*; $A_{\text{о}}$ – расстояние между этими отверстиями. Погрешность базирования корпуса в направлении оси Z равна нулю.

Рис. 4.43. Схема перекоса корпуса при установке на плоскость и два отверстия

Очевидно, что при растачивании отверстия *III* в корпусе на настроенном станке, когда инструмент занимает неизменное положение относительно оси цилиндрического пальца, получить размер A (см. рис. 4.42) с погрешностью, меньшей погрешности базирования $\varepsilon_{бx}$, невозможно. Отклонение от параллельности оси этого отверстия относительно, например, обработанных на предшествующей операции боковых плоскостей *IV* и *V* корпуса не может быть меньше его перекоса при базировании. На точность диаметра отверстия *III* погрешность базирования корпуса непосредственного влияния не оказывает, однако приводит к неравномерности припуска и образованию погрешностей формы этого отверстия. Таким образом, погрешность базирования заготовок приводит к погрешностям размеров, формы и расположения обработанных поверхностей.

Погрешности базирования корпуса можно избежать или, по крайней мере, сократить, если вместо жестких пальцев использовать в приспособлении подпружиненные конические (рис. 4.44, *а*) или упругодеформируемые (рис. 4.44, *б*) пальцы.

а *б*

Рис. 4.44. Схемы установки заготовки отверстием на подпружиненный конический (а) и упругодеформируемый (б) пальцы

На рис. 4.45 показана схема установки втулки на жесткую цилиндрическую оправку (с зазором) для обработки наружной поверхности. Максимально возможный при обработке партии втулок эксцентриситет осей оправки и отверстия и представляет собой погрешность базирования втулки в радиальном направлении $\varepsilon_{бr}$. Погрешность базирования втулки в осевом направлении равна нулю.

Вполне очевидно, что обеспечить радиальное биение наружной поверхности втулки относительно поверхности отверстия меньше $2\varepsilon_{бr}$ при данной схеме установки невозможно. На погрешность диаметра наружной поверхности втулки погрешность базирования $\varepsilon_{бr}$ непосредственного влияния не оказывает, но может вызвать погрешности формы этой поверхности.

Рис. 4.45. Схема установки втулки на жесткую оправку

Погрешность базирования втулки $\varepsilon_{бr}$ можно исключить установкой:

- на коническую центровую оправку с малой конусностью;
- на разжимную оправку;
- на жесткую цилиндрическую оправку с гарантированным натягом.

Рассмотренный пример показывает, что при выборе схемы базирования заготовки нужно, в первую очередь, исходить из условия обеспечения точности расположения ее поверхностей, а затем уже – из условия обеспечения заданных размеров.

Погрешность закрепления. При закреплении положение заготовки, достигнутое при базировании, в той или иной степени изменяется – возникает *погрешность закрепления*. Эту погрешность можно рассматривать как отклонение технологических баз от установочных элементов приспособления, возникшее при закреплении. Причем это отклонение берется как наибольшее для партии заготовок.

Причинами образования погрешности закрепления являются:

- контактные деформации в стыках технологических баз с установочными элементами приспособления;
- погрешности формы технологических баз и поверхностей заготовки, с которыми взаимодействуют зажимные элементы приспособления;
- непостоянство сил закрепления и неодновременность их приложения.

На рис. 4.46 показана схема закрепления заготовки корпуса. При закреплении происходят контактные деформации стыка «нижняя плоскость корпуса–опорные штыри» и корпус смещается вниз на величину Δ_z. При обработке (закреплении) партии корпусов из-за колебаний параметров шероховатости и волнистости нижней плоскости, а также сил закрепления величина Δ_z оказывается переменной. Разность между максимальным и минимальным значениями этой величины и представляет собой погрешность закрепления корпуса в вертикальном направлении $\varepsilon_{зz}$. Следует отметить, что эта погрешность оказывает такое же влияние на точность обработки заготовки, как и погрешность базирования.

Рис. 4.46. Схема закрепления заготовки корпуса. $P_з$ – сила закрепления

На рис. 4.47 приведены схемы установки заготовки вала в трехкулачковом самоцентрирующем патроне. Из-за конусообразности заготовки (рис. 4.47, *а*) при закреплении возникает осевая сила $P_о$, которая вызывает ее смещение относительно патрона на величину $\Delta_о$. Это смещение при обработке (закреплении) партии заготовок может изменяться от нуля до некоторого максимального значения, которое и принято считать погрешностью закрепления в осевом направлении $\varepsilon_{зо} = \Delta_{о\,max}$.

Так как цилиндрическая поверхность заготовки обычно наделена отклонениями формы как в осевом, так и в поперечном сечениях, то при закреплении может сформироваться такая система сил, которая вызовет как осевое смещение заготовки, так и ее перекос относительно оси патрона. Таким образом возникают погрешности закрепления заготовки вала в осевом ($\varepsilon_{зо}$) и радиальном ($\varepsilon_{зr}$) направлениях (рис. 4.47, *б*).

а *б*

Рис. 4.47. Схемы закрепления заготовки вала в трехкулачковом самоцентрирующем патроне: а – при конусообразности цилиндрической поверхности валика; б – при наличии погрешностей формы этой поверхности в осевом и поперечном сечениях

Рис. 4.48. Схема перемещений и деформаций призматической заготовки при закреплении

Очевидно, что при подрезке торца заготовки вала на настроенном станке (когда резец занимает неизменное положение относительно выточки кулачков) выдержать размер до его левого торца (технологической базы) с погрешностью, меньшей $\varepsilon_{зо}$, невозможно. Погрешность закрепления $\varepsilon_{зг}$ непосредственного влияния на точность диаметра заготовки при обтачивании не оказывает. Однако эта погрешность приводит к неравномерности припуска на обтачивание и может вызвать появление погрешностей формы обточенной поверхности.

При закреплении наряду со смещениями и перекосами заготовки относительно приспособления происходят и ее собственные деформации, которые также относятся к погрешностям закрепления. Эти деформации тесно связаны с погрешностями формы технологических баз заготовки.

На рис. 4.48 дана схема закрепления призматической заготовки, осуществляемого с помощью прихватов.

Обработке (торцевому фрезерованию) подвергается верхняя плоскость заготовки. Ее нижняя плоскость, являющаяся установочной базой, и плоскость полок, с которой взаимодействуют прихваты, имеют погрешности формы. Положение заготовки после базирования показано на рис. 4.48, *а* (точка *А* принадлежит заготовке). Предположим, что прихваты срабатывают неодновременно. Первым в работу вступает

правый прихват. Под действием силы $P_з'$ заготовка повернется относительно точки A. Одновременно она под действием этой силы (ее составляющей P_x) сместится вправо на величину $\varepsilon_{зx}$ и займет положение, показанное на рис. 4.48, *б*. При срабатывании левого прихвата заготовка при определенных условиях будет упруго деформирована силой $P_з'$ на величину $\varepsilon_{зz}$. Заготовка после закрепления и фрезерования верхней плоскости показана на рис. 4.48, *в*. При раскреплении под действием сил упругости материала нижняя плоскость заготовки примет первоначальную форму. При этом обработанная верхняя плоскость приобретет соответствующую погрешность формы $\Delta_ф$ (рис. 4.48, *г*).

Очевидно, что в рассмотренном примере деформации заготовки могут быть резко уменьшены, если силы закрепления приложить не параллельно, а перпендикулярно плоскости XOZ.

Основываясь на вышеизложенном, можно указать, что для сокращения погрешности закрепления необходимо:

- обеспечивать высокую точность и качество поверхностного слоя технологических баз;
- обеспечивать рациональное направление и точки приложения сил закрепления;
- стабилизировать значения сил закрепления путем использования механизированных приводов в приспособлениях.

Погрешность приспособления. Эта погрешность $\varepsilon_{пр}$ является результатом неточностей изготовления приспособления и его установки на станке, а также неравномерного износа установочных элементов от многократного взаимодействия с заготовками.

Например, широко используемые трехкулачковые самоцентрирующие патроны при каждой установке на шпинделе станка занимают различные положения, которые колеблются в пределах зазора между посадочной шейкой шпинделя и посадочным отверстием в патроне. Вследствие этого заготовка, установленная в патроне, оказывается несоосной со шпинделем станка. Кулачки патрона из-за зазоров между ними и направляющими при закреплении заготовки перекашиваются. Это ведет к перекосу заготовки относительно шпинделя станка. При эксплуатации патрона установочные поверхности кулачков изнашиваются. Износ у разных кулачков может быть неодинаковым. Он также может сопровождаться образованием погрешностей формы указанных поверхностей. Все это увеличивает погрешность установки заготовок.

Для уменьшения рассматриваемой составляющей погрешности установки заготовок необходимо:

• повышать точность приспособлений и точность их установки на станке;

• использовать приспособления с минимальным числом подвижных сопряжений;

• выполнять обработку установочных поверхностей приспособлений непосредственно на том станке, для оснащения которого они предназначены.

Например, погрешность установки втулки на внутришлифовальном станке можно резко сократить, если вместо трехкулачкового самоцентрирующего патрона использовать мембранный патрон.

Простейший мембранный патрон (рис. 4.49) состоит из планшайбы *1*, мембраны *2* с большим количеством кулачков *3* и штока *4*. При воздействии штока на мембрану последняя прогибается, а кулачки разводятся и обработанная втулка *5* извлекается из патрона (рис. 4.49, *а*). Затем устанавливается следующая втулка, шток отводится влево, и под действием сил упругости материала мембрана принимает первоначальную форму, а кулачки сводятся и зажимают втулку (рис. 4.49, *б*).

Рис. 4.49. Мембранный патрон:
а – с разведенными кулачками; б – со сведенными кулачками

После установки мембранного патрона на станок установочные поверхности его кулачков шлифуют на этом же станке. Это позволяет практически устранить влияние погрешности установки патрона на станке и износа его кулачков на точность установки заготовки.

Аналогичным образом поступают и в ряде других случаев. Так, трехкулачковые самоцентрирующие патроны оснащают «сырыми» кулачками, которые растачивают непосредственно на токарном станке. После установки электромагнитной плиты на плоскошлифовальный станок ее установочную плоскость в обязательном порядке шлифуют на этом же станке. Так же поступают при износе установочной плоскости этой плиты.

Определение погрешности установки. Погрешность установки заготовки $\varepsilon_у$ (в заданном направлении) находится суммированием ее составляющих. Рассматривая $\varepsilon_б$, $\varepsilon_з$ и $\varepsilon_{пр}$ как поля рассеивания случайных величин, имеющих нормальное распределение, получаем

$$\varepsilon_у = \sqrt{\varepsilon_б^2 + \varepsilon_з^2 + \varepsilon_{пр}^2}\ .$$

Погрешность базирования ($\varepsilon_б$) определяется расчетом на основе геометрических соотношений. Погрешность закрепления ($\varepsilon_з$) и погрешность приспособления ($\varepsilon_{пр}$) находятся по справочникам. Так как разделить эти составляющие погрешности установки при их экспериментальном определении затруднительно, то обычно в справочниках указывается только значение погрешности закрепления, в которую входит и погрешность соответствующего приспособления. С учетом сказанного получаем

$$\varepsilon_у = \sqrt{\varepsilon_б^2 + \varepsilon_з^2}\ .$$

При установке заготовок в центрах, самоцентрирующих патронах, на разжимных оправках и т. п. базирование и закрепление заготовок осуществляется одновременно, поэтому отделить их друг от друга трудно. Принято считать, что в указанных случаях погрешность базирования заготовок в радиальном направлении равна нулю. Таким образом, $\varepsilon_у = \varepsilon_з$.

Рис. 4.50. Схема выверки положения втулки

Установка заготовок с выверкой. Наряду с рассмотренной выше установкой заготовок в приспособлениях без выверки в условиях единичного и мелкосерийного производства широко используется установка с выверкой положения каждой заготовки по разметочным рискам или непосредственно по поверхности заготовки. На рис. 4.50 показана схема выверки положения втулки на внутришлифовальном станке. Для обеспечения жесткого допуска радиального биения шлифуемого отверстия *1* относительно ранее прошлифованного отверстия *2* поступают следующим образом. С помощью прокладок *3* и неоднократного закрепления–раскрепления втулки добиваются допустимого радиального биения от-

верстия *2* относительно оси шпинделя бабки изделия. Это биение измеряют в двух сечениях отверстия *2* с помощью индикаторного устройства. После выверки производят шлифование отверстия *1*.

Погрешность установки заготовки с выверкой равна погрешности выверки. Например, если после выверки втулок радиальное биение отверстия *2* относительно оси шпинделя бабки изделия составляет до 0,01 мм, то погрешность установки втулок в радиальном направлении $\varepsilon_у = 0{,}005$ мм. При этом $\varepsilon_у$ включает в себя как погрешность закрепления, так и погрешность приспособления.

Необходимо отметить, что выверка позволяет обеспечить высокую точность установки заготовок, но является очень трудоемкой. Поэтому уже в условиях серийного производства установки заготовок с выверкой стараются избегать. Вместе с тем в отдельных случаях процесс выверки автоматизируют и эффективно используют установку заготовок сложной формы с выверкой в условиях крупносерийного производства.

4.2.1.8. Погрешность размерной настройки технологической системы

Под *размерной настройкой* технологической системы понимается придание режущим кромкам инструмента требуемого положения относительно технологических баз заготовок. Задача размерной настройки – получение размера заготовки в пределах установленного поля допуска.

Рис. 4.51. Схема размерной настройки методом пробных ходов:
l_1, l_2 – соответственно участки установившегося процесса резания при первом и втором пробных ходах

Основным методом размерной настройки является метод пробных ходов, суть которого состоит в следующем (рис. 4.51). К установленной на станке заготовке подводят инструмент, придают ему с помощью лимба такое положение, при котором риск получить бракованную заготовку сводится к нулю, и обрабатывают небольшой участок поверхности. После этого станок останавливают, измеряют полученный размер, опреде-

ляют его отклонение от требуемого (например, размера по чертежу детали) и вносят с помощью лимба поправку в положение инструмента. Затем вновь выполняют пробный ход, измеряют полученный размер и при необходимости вносят новую поправку в положение инструмента. Так путем пробных ходов получают размер в пределах установленного поля допуска. После этого обрабатывают заготовку на всю длину, т. е. осуществляют рабочий ход. Указанные действия выполняют при обработке каждой поверхности заготовки. Они целиком повторяются при обработке каждой последующей заготовки.

Чтобы процесс резания был установившимся, длина участка поверхности при каждом следующем пробном ходе должна быть несколько больше, чем при предыдущем (рис. 4.51). Если длина обрабатываемой поверхности небольшая, то пробные ходы выполняют на всей длине.

Необходимо подчеркнуть, что при методе пробных ходов режущему инструменту перед обработкой разных заготовок придается различное положение относительно их технологических баз. Например, при обтачивании наружной поверхности (рис. 4.51), чем выше твердость заготовки и больше снимаемый с нее припуск, тем ближе к оси заготовки располагается инструмент перед выполнением рабочего хода. За счет этого в значительной степени сокращаются погрешности обработки заготовок, вызываемые упругими деформациями технологической системы от сил резания. Очевидно, что при этом методе размерной настройки могут быть также существенно снижены погрешности обработки заготовок, обусловленные износом режущего инструмента. Вследствие вышеизложенного метод пробных ходов обеспечивает высокую точность обработки заготовок, но оказывается в описанном выше варианте очень трудоемким. Поэтому его применяют в основном в условиях единичного и мелкосерийного производства.

Рис. 4.52. Схема шлифования заготовки на круглошлифовальном станке с прибором активного контроля: 1 – заготовка; 2 – шлифовальный круг; 3 – прибор активного контроля

При шлифовании и хонинговании метод пробных ходов эффективно используют и в серийном производстве, оснащая станки приборами активного контроля. На рис. 4.52 приведена схема шлифования заготовки на круглошлифовальном станке с прибором активного контроля, который

осуществляет непрерывное измерение текущего размера заготовки. Когда текущий размер оказывается близким к требуемому, прибор сначала вырабатывает команду на прекращение радиальной подачи, т. е. переходу к режиму выхаживания, а затем, когда текущий размер заготовки оказывается в пределах поля допуска, дает команду на отвод шлифовального круга. Приборами активного контроля оснащают практически все шлифовальные станки с ЧПУ. Причем эти приборы выполняют широкодиапазонными, программируемыми, что позволяет одним прибором контролировать разные размеры.

В условиях серийного и массового производства настройка ведется на обработку партии заготовок. Инструменту придается неизменное положение относительно установочных элементов приспособления, и при этом положении производится обработка всех заготовок партии до его поднастройки. Такая обработка заготовок получила название «обработка на настроенных станках». На рис. 4.53 приведена схема фрезерования уступа заготовки, осуществляемого концевой фрезой на вертикально-фрезерном станке. Фрезе с помощью метода пробных ходов придается неизменное положение относительно неподвижной губки *1* тисов и их основания *2* и соответственно технологических баз заготовки, которое обеспечивает получение технологических размеров A_1 и A_2 в пределах установленных полей допусков. Функции станочника (оператора) сводятся к установке и снятию заготовок, включению и выключению подачи стола и периодическому контролю размеров A_1 и A_2, которые при обработке партии заготовок выдерживаются автоматически.

Рис. 4.53. Схема фрезерования заготовки на вертикально-фрезерном станке

При приближении размеров A_1 и (или) A_2 к границам полей допусков, которое в большинстве случаев происходит из-за износа инструмента, производится поднастройка технологической системы.

Для размерной настройки технологической системы необходимо знать настроечный размер. *Настроечным размером* $A_н$ (см. рис. 4.51) принято называть размер заготовки, к получению которого нужно стремиться при настройке.

При методе пробных ходов в качестве настроечного размера $A_н$ обычно используют средний размер заготовки $A_{ср}$, т. е.

$$A_н = A_{ср} = \frac{A_{нб} + A_{нм}}{2},$$

где $A_{нб}, A_{нм}$ – соответственно наибольшее и наименьшее предельные значения технологического размера, выдерживаемого на данном переходе (операции). Фактические значения технологического размера всегда в той или иной степени отличаются от $A_н$. Наибольшее отклонение фактического технологического размера от $A_н$ в партии заготовок, измеренного на участке пробных ходов, можно считать погрешностью настройки. Эта погрешность $\Delta_н$ складывается из погрешности регулирования $\Delta_{рег}$ положения инструмента по лимбу и погрешности измерения $\Delta_{изм}$ размера заготовки. Считая распределения погрешностей регулирования и измерения нормальными, погрешность настройки методом пробных ходов находят по формуле

$$\Delta_н = \sqrt{\Delta_{рег}^2 + \Delta_{изм}^2}\ .$$

Погрешность $\Delta_{рег}$ определяется ценой деления лимба станка, погрешность $\Delta_{изм}$ зависит от типа измерительного инструмента. Данные об этих погрешностях приводятся в справочной литературе.

При настройке на обработку партии заготовок настроечный размер $A_н$ должен быть таким, чтобы можно было получить возможно большее число годных заготовок до поднастройки. Для определения $A_н$, обеспечивающего эту возможность, нужно располагать точечной диаграммой, по которой можно судить о случайных и систематических погрешностях обработки в зависимости от времени t или числа обработанных заготовок n. Однако точечную диаграмму можно получить только на основе измерений размеров заготовок в предшествующий период работы; на момент первой настройки такой диаграммы нет. В связи с этим размер-

ную настройку на обработку партии заготовок целесообразно выполнять в два этапа, как это показано на рис. 4.54 для случая получения охватываемого размера.

Рис. 4.54. Схема размерной настройки на обработку партии заготовок

На первом этапе, желая исключить брак, методом пробных ходов производят настройку, используя в качестве настроечного размера $A'_н$ среднее значение технологического размера A. При этой настройке выполняют обработку партии заготовок, измеряя их размеры в порядке схода со станка и, таким образом, получают точечную диаграмму обработки. На ней систематические погрешности из-за износа инструмента определяются тангенсом угла наклона к оси абсцисс прямой $\overline{A'_t} = f(t)$, где $\overline{A'_t}$ – текущее среднее значение размера заготовок. Случайные погрешности характеризуются полем рассеивания размера, границы которого показаны прямыми, параллельными прямой $\overline{A'_t} = f(t)$. Параметры функции $\overline{A'_t} = f(t)$ находят методом наименьших квадратов. Текущее значение среднего квадратичного отклонения размеров подсчитывают для группы (*I*, *II*, *III*, …) последовательно обработанных заготовок. Их число в группе $n_{гр}$ обычно принимают равным 5. Так как для заготовок разных групп средние квадратичные отклонения оказываются несколько отличными друг от друга, то из них выбирают наибольшее. Считая распределение размеров в пределах поля рассеивания нормальным, принимают $\omega_t = 6\sigma_{t\max}$.

На втором этапе настройки, желая добиться получения возможно большего числа годных заготовок без поднастройки, поле рассеивания размеров ω_t смещают к нижней границе поля допуска на технологиче-

ский размер A. (Тангенсы углов наклона прямых $\overline{A'_t} = f(t)$ и $\overline{A_t} = f(t)$ считают одинаковыми). В качестве настроечного размера $A_н$ берут размер $A_{нм} + 3\sigma_{t\,max}$. Методом пробных ходов производят настройку технологической системы на этот размер. Затем обрабатывают несколько заготовок, измеряют их размеры и, если среднее значение фактических размеров этих заготовок $\overline{A}_{tф}$ оказывается близким к $A_н = A_{нм} + 3\sigma_{t\,max}$, то производят обработку партии заготовок. В противном случае вносят коррекцию в положение режущего инструмента.

Аналогичным образом производится размерная настройка для получения охватывающих размеров в партии заготовок. В этом случае настроечный размер на втором этапе настройки составит

$$A_н = A_{нб} - 3\sigma_{t\,max}.$$

Погрешностью настройки $\Delta_н$ на обработку партии заготовок можно считать отклонение $\overline{A}_{tф}$ от $A_н$. Эту погрешность определяют по формуле

$$\Delta_н = \sqrt{\Delta^2_{рег} + \Delta^2_{изм} + \Delta^2_{расч}},$$

где $\Delta_{расч}$ – погрешность определения $\overline{A}_{tф}$ из-за ограниченности числа заготовок в группе $n_{гр}$. Погрешность $\Delta_{расч}$ находится по соотношениям математической статистики. Например, при $n_{гр} = 5$, $\sigma_{t\,max} = 0{,}02$ мм с вероятностью 0,9 получим $\Delta_{расч} \approx 0{,}02$ мм.

Если учесть погрешность настройки, то формулы для определения настроечного размера при получении охватываемых и охватывающих размеров заготовок соответственно примут вид

$$A_н = A_{нм} + 3\sigma_{t\,max} + \Delta_н;$$

$$A_н = A_{нб} - 3\sigma_{t\,max} - \Delta_н.$$

Размерная настройка технологической системы, особенно при многоинструментной обработке, оказывается достаточно трудоемкой. Для снижения трудоемкости применяют настройку по *эталону*, который представляет собой аналог обрабатываемой на станке заготовки.

Эталон устанавливают на неработающий станок вместо заготовки, затем суппорты смещают в положение, соответствующее окончанию рабочего хода. При этом режущие инструменты устанавливают и закрепляют в держателях так, чтобы их режущие кромки касались соответствующих поверхностей эталона. Далее эталон снимают со станка и вместо него устанавливают заготовку.

Эталон изготавливают с высокой точностью (его поверхности шлифуют). Размеры эталона выполняют несколько отличными от размеров

заготовок, которые предстоит обработать на станке. Так, диаметр эталона $D_{эт}$ (рис. 4.55), предназначенного для настройки на обработку заготовок валов, принимают меньше диаметра заготовки на величину поправки П. Она включает упругое отжатие инструмента и заготовки Δ_y и шероховатость ее обработанной поверхности Rz, которые увеличивают диаметр заготовки по сравнению с диаметром эталона. Очевидно, что при обработке отверстий влияние Δ_y и Rz на его диаметр будет противоположным и знак поправки будет положительным. Таким образом, при обработке наружных поверхностей и отверстий диаметр эталона определится соответственно из соотношений:

$$D_{эт} = D_{заг} - П = D_{заг} - 2(\Delta_y + Rz);$$

$$D_{эт} = D_{заг} + П = D_{заг} + 2(\Delta_y + Rz).$$

Рис. 4.55. Соотношение между диаметрами эталона и заготовки

При настройке по эталону важно точно зафиксировать момент касания инструментом соответствующей поверхности эталона. С этой целью чаще всего между эталоном и инструментом размещают папиросную бумагу, которую непрерывно смещают. При «закусывании» бумаги считается, что инструмент касается эталона.

Погрешность настройки по эталону зависит от ряда составляющих: погрешности его изготовления, погрешности установки на станке, погрешности определения момента касания инструментом эталона и др. В целом этот метод настройки обеспечивает ее существенную погрешность, которая составляет 0,05…0,1 мм.

Иногда в качестве эталона используют ранее обработанную на станке заготовку. В этом случае положение инструментов, установленных по «эталону», приходится, как правило, в дальнейшем корректировать по результатам обработки первых заготовок.

При поднастройке технологических систем в условиях серийного и массового производства для снижения затрат времени применяют взаимозаменяемые инструменты. На рис. 4.56 приведена схема так называемой взаимозаменяемой настройки. Требуемая длина резца $L_р$ (рис. 4.56, *а*) первоначально устанавливается методом пробных ходов. При износе резца его заменяют на новый. При этом длина нового резца $L_р$ обеспечивается вне станка методом регулирования, осуществляемого винтом *1* с контргайкой *2* (рис. 4.56, *б*).

Рис. 4.56. Схема взаимозаменяемой настройки:
а – положение резца на станке; б – настройка длины резца вне станка.
1 – регулировочный винт; 2 – контргайка; 3 – измерительная головка

В ряде случаев взаимозаменяемыми выполняют целиком съемные суппорты станков с несколькими инструментами, также настраиваемыми вне станка. Это позволяет значительно сократить простои станков, связанные с их размерной поднастройкой.

4.2.1.9. Определение суммарной погрешности обработки на технологическом переходе

При проектировании технологических процессов изготовления деталей эта погрешность представляет основной интерес.

В простейшем случае суммарную погрешность размера заготовок, обрабатываемых на настроенном станке, находят алгебраическим суммированием элементарных погрешностей:

$$\Delta = \varepsilon_{у} + \Delta_{н} + \Delta_{у} + \Delta_{и} + \Delta_{т} + \sum \Delta_{ф}, \qquad (4.6)$$

где $\varepsilon_{у}$ – погрешность установки заготовок; $\Delta_{н}$ – погрешность настройки технологической системы; $\Delta_{у}$ – погрешность от упругих деформаций этой системы от сил резания; $\Delta_{и}$ – погрешность от износа режущего инструмента; $\Delta_{т}$ – погрешность от температурных деформаций технологической системы.

Первые пять слагаемых в формуле (4.6) представляют собой поля рассеивания соответствующих элементарных погрешностей и отражают их влияние на рассеивание размера заготовок. Последнее шестое слагаемое $\sum \Delta_{ф}$ отражает влияние геометрических погрешностей станка, деформаций заготовок от усилий закрепления и упругих деформаций технологической системы от сил резания на погрешность формы обрабатываемой поверхности заготовок.

Погрешность $\Delta_{у}$ необходимо находить для сечений заготовок, в которых жесткость технологической системы минимальна. Например, при точении консольно закрепленной заготовки величину $\Delta_{у}$ следует определять у ее правого торца.

Суммарную погрешность диаметральных размеров следует определять без учета погрешности установки $\varepsilon_{у}$, так как она, как было показано выше, непосредственного влияния на погрешность этих размеров не оказывает. По этой же причине $\varepsilon_{у}$ исключается из суммарной погрешности размера, связывающего два противолежащих элемента заготовки, подвергаемых одновременной обработке набором режущих инструментов.

Погрешность $\sum \Delta_{ф}$ нужно находить с учетом взаимной компенсации ее отдельных составляющих. Например, при обтачивании консольно закрепленного в патроне валика из-за прогиба от сил резания его диаметр на правом конце оказывается больше, чем у патрона (см. рис. 4.30, *а*). В то же время при наличии отклонения от параллельности оси шпинделя относительно направляющих станины в горизонтальной плоскости обточенная поверхность заготовки получается конической (см. рис. 4.26, *а*). Если вершина конуса обращена в сторону задней бабки, то погрешности формы частично или полностью компенсируются. При обратном положении вершины конуса погрешности формы складываются.

Расчет суммарной погрешности размера по формуле (4.6) достаточно прост. Однако значения Δ получаются сильно завышенными.

Более точно суммарную погрешность размера можно оценить, если учесть вероятностную природу элементарных погрешностей. Первые пять слагаемых в формуле (4.6) представляют собой случайные погрешности (величины). Слагаемое $\sum \Delta_ф$ представляет собой постоянную систематическую погрешность. Распределения $\varepsilon_у$, $\Delta_н$ и $\Delta_у$ с высокой точностью можно считать нормальными, а распределения $\Delta_и$ и $\Delta_т$ – соответствующими закону равной вероятности. Тогда [по аналогии с формулой (3.22)] суммарная погрешность обработки может быть представлена в виде

$$\Delta = t_\Delta \sqrt{\lambda_1^2(\varepsilon_у^2 + \Delta_н^2 + \Delta_у^2) + \lambda_2^2(\Delta_и^2 + \Delta_т^2)} + \sum \Delta_ф. \tag{4.7}$$

Обычно принимают $t_\Delta = 3$. Для нормального распределения коэффициент $\lambda_1^2 = \frac{1}{9}$; для распределения по закону равной вероятности $\lambda_2^2 = \frac{1}{3}$. С учетом этого формула (4.7) примет вид

$$\Delta = \sqrt{\varepsilon_у^2 + \Delta_н^2 + \Delta_у^2 + 3\Delta_и^2 + 3\Delta_т^2)} + \sum \Delta_ф. \tag{4.8}$$

Для диаметральных размеров

$$\Delta = \sqrt{\Delta_н^2 + \Delta_у^2 + 3\Delta_и^2 + 3\Delta_т^2)} + \sum \Delta_ф. \tag{4.9}$$

Формулы (4.8)–(4.9) получили наибольшее распространение. Их основное достоинство в том, что по отдельным элементарным погрешностям, определенным расчетом, можно найти ожидаемую точность размера. Это позволяет на ранних стадиях проектирования технологического процесса изготовления детали сравнивать различные варианты выполнения технологического перехода и выбирать из них наиболее приемлемый. Кроме того, это важно при освоении новых технологических процессов изготовления деталей, когда, например, возникает задача установить причины недопустимо низкой точности обработки и найти пути ее повышения.

Вместе с тем следует иметь в виду, что расчет суммарной погрешности обработки заготовок в ряде случаев оказывается затруднен отсутствием надежных исходных данных (например, данных о размерном износе режущих инструментов, жесткости элементов технологической системы и др.), а также отсутствием методик расчета отдельных элементарных погрешностей, например, погрешностей от температурных деформаций станка. Поэтому наряду с расчетом погрешностей обработки в технологии машиностроения широко используют таблицы точности обработки, которые получают путем статистических исследований точности в производственных условиях.

4.2.2. Об обеспечении точности при выполнении технологического процесса изготовления детали

Как отмечалось, за один переход исходная заготовка, как правило, не может быть превращена в готовую деталь. Для этого требуется выполнять ряд переходов или операций, совокупность которых образует технологический процесс изготовления детали. По мере его выполнения заготовка по форме и размерам становится все более близкой к детали и после последней операции превращается в нее.

Процесс преобразования исходной заготовки в деталь может быть осуществлен различными методами и средствами технологического оснащения. Так, для обеспечения требуемых размеров и формы детали может быть использована обработка резанием, электроэрозионная и электрохимическая обработка.

При установлении связей между параметрами точности заготовки, получающимися по ходу технологического процесса изготовления детали, используют понятие *уточнение*. Это понятие отражает связь точности (погрешности) обработки до и после выполнения операции (перехода) или всего технологического процесса.

Под фактическим уточнением $\varepsilon_{ф}$ технологического процесса понимается отношение погрешности исходной заготовки $\Delta_{заг_и}$ к погрешности детали $\Delta_{д}$ по данному параметру (размеру, форме, расположению поверхностей):

$$\varepsilon_{ф} = \Delta_{заг_и} / \Delta_{д}.$$

После выполнения каждого перехода (операции) погрешности заготовки уменьшаются в соответствии с величиной

$$\varepsilon_{ф_i} = \frac{\Delta_{заг_{i-1}}}{\Delta_{заг_i}},$$

где $\Delta_{заг_{i-1}}$, $\Delta_{заг_i}$ – соответственно погрешности до и после выполнения i-го перехода.

Очевидно, что после m технологических переходов, содержащихся в технологическом процессе изготовления детали, уточнение

$$\varepsilon_{ф} = \varepsilon_{ф1}\varepsilon_{ф2}...\varepsilon_{фm} = \prod_{i=1}^{m} \varepsilon_{фi}.$$

Для получения годной детали по тому или иному параметру точности необходимо, чтобы соответствующий допуск детали

$$T_{д} \geq \Delta_{заг_и} / \varepsilon_{ф} = \Delta_{заг_и} / \prod_{i=1}^{m} \varepsilon_{ф}. \qquad (4.10)$$

При проектировании технологического процесса изготовления детали первой и основной задачей является определение перечня переходов (операций) обработки каждой поверхности ее заготовки и уточнений ε_{ϕ_i} на каждом переходе, обеспечивающих выполнение неравенства (4.10). Решение этой задачи изложено в разд. 6.

Как показано в разд. 3, отдельные размеры детали (конструкторские размеры) могут получаться в виде замыкающих звеньев в технологических размерных цепях, составляющими звеньями которых являются технологические размеры. Другими словами, точность отдельных конструкторских размеров может определяться точностью ряда технологических размеров, получающихся на различных переходах и операциях технологического процесса. Обеспечение точности этих конструкторских размеров возможно только при их размерной увязке с соответствующими технологическими размерами. Такая увязка производится при размерном анализе проектируемого технологического процесса, методика которого рассмотрена в разд. 6.

4.2.3. Технологическая наследственность при изготовлении детали

Формирование параметров точности и качества поверхностных слоев детали, определяющих ее эксплуатационные свойства, происходит на протяжении всего технологического процесса. Между отдельными из этих параметров на различных операциях существуют довольно сложные взаимосвязи, которые необходимо учитывать при разработке технологического процесса изготовления детали. В этой связи в технологии машиностроения используют понятия «технологическое наследование» и «технологическая наследственность». *Технологическим наследованием* называют явление переноса свойств заготовки от предшествующих операций к последующим. Сохранение же этих свойств у заготовки (детали) называют *технологической наследственностью.*

Установлено, что в ходе технологического процесса имеет место наследование конструктивных форм заготовки (детали), погрешностей ее технологических баз, погрешностей размеров, формы и расположения поверхностей заготовки, волнистости этих поверхностей, физико-механических свойств поверхностных слоев и др.

Простейшим проявлением технологического наследования является, например, образование погрешности формы поперечного сечения заготовки при обтачивании, которые вызываются переменными по углу ее поворота упругими отжатиями в технологической системе из-за наличия одноименной погрешности у исходной заготовки (рис. 4.57). Причем погрешности формы заготовки, возникшие при обтачивании, могут в той

или иной степени наследоваться при дальнейшей отделочной обработке и переноситься на готовую деталь.

Рис. 4.57. Схема наследования погрешности формы исходной заготовки (1), обточенной заготовкой (2)

Примером технологического наследования конструктивных форм заготовки (детали) и погрешности технологических баз может служить следующий. Для повышения точности центровых отверстий в ряде случаев производят их правку путем пластического деформирования твердосплавным центром, внедряемым в центровое отверстие. При наличии на наружной поверхности заготовки вала лысок центровые отверстия при этом методе правки приобретают погрешность формы (рис. 4.58), которая возникает из-за облегченных условий пластического течения металла в перпендикулярном лыскам направлении. При последующем круглом шлифовании заготовки вала, которое осуществляется обычно при установке на неподвижные центры, жесткость контакта «центр–центровое отверстие» становится переменным по углу поворота заготовки. Это приводит к погрешности формы прошлифованной поверхности, которая оказывается близкой к погрешности формы центровых отверстий.

а *б*

Рис. 4.58. Влияние лысок на форму центрового отверстия вала (по данным А.М. Дальского): а – конфигурация вала; б – круглограмма центрового отверстия

Отметим, что подобным же образом волнистость центровых отверстий трансформируется в волнистость поверхностей, обработанных круглым шлифованием.

Рассмотрим пример технологического наследования параметров качества поверхностного слоя. При круглом врезном шлифовании поверхности стальной закаленной заготовки с относительно грубой шероховатостью ($Rz \geq$ 40 мкм) температура в ее поверхностном слое оказывается переменной: наибольшей напротив вершин выступов и наименьший напротив дна впадин микронеровностей (рис. 4.59). В результате этого в поверхностном слое закаленной заготовки при шлифовании, характеризуемом резким нагревом и охлаждением этого слоя, могут происходить явления вторичной закалки (под вершинами выступов) и вторичного отпуска (под дном впадин) соответственно с образованием структур мартенсита и аустенита и троостита и троостосорбита. Таким образом, грубая шероховатость поверхности закаленной заготовки обуславливает формирование при шлифовании поверхностного слоя с неоднородной структурой и различной микротвердостью.

Рис. 4.59. Схема формирования неоднородного поверхностного слоя закаленной заготовки при круглом врезном шлифовании: 1 – шероховатость после обтачивания; 2 – шероховатость после шлифования; 3 – температура при шлифовании; 4 – зоны вторичной закалки; 5 – зоны вторичного отпуска. AB и CD – соответственно текущее и конечное положение шлифовального круга (по данным П.И. Ящерицына, Э.В. Рыжова, В.И. Аверченкова)

Зная проявления технологического наследования, можно принять меры для повышения точности и качества поверхностного слоя деталей и их эксплуатационных свойств. Так, во втором примере следует отказаться от правки центровых отверстий пластическим деформированием и пе-

рейти к их правке путем шлифования или притирки. В третьем примере необходимо при обтачивании заготовки обеспечить меньшую шероховатость, а также принять меры для снижения теплонапряженности процесса шлифования.

Особое значение учет явлений технологического наследования приобретает при изготовлении прецизионных деталей, допуски которых составляют микрометры или доли микрометра. При этом проявляется наследственное влияние многих факторов, воздействия которых при изготовлении деталей обычной точности (IT 6–IT 7) являются незначительными.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Как добиваются улучшения свойств материала исходных заготовок, получаемых литьем и обработкой давлением?
2. Как изменяют свойства стальных заготовок процессы термической обработки (отжиг, нормализация, закалка, отпуск)?
3. Как изменяют свойства стальных заготовок процессы химико-термической обработки (цементация, азотирование, нитроцементация)?
4. Перечислите основные показатели качества поверхностного слоя деталей.
5. Как влияет качество поверхностного слоя на эксплуатационные свойства деталей и их соединений?
6. Как влияют параметры режима резания лезвийным инструментом на качество поверхностного слоя?
7. Как влияют параметры режима резания абразивным инструментом на качество поверхностного слоя?
8. С какой целью детали обрабатывают методами поверхностного пластического деформирования?
9. Какими путями можно исключить наклеп и остаточные напряжения в поверхностном слое деталей?
10. Перечислите основные причины образования погрешностей обработки заготовок, осуществляемой на металлорежущих станках.
11. Почему высокоточные станки следует использовать только для выполнения чистовых операций?
12. Как снизить погрешности обработки заготовок от упругих деформаций технологической системы от сил резания?
13. Как снизить погрешности обработки заготовок от температурных деформаций технологической системы?
14. Как снизить погрешности обработки заготовок из-за износа режущих инструментов?

15. Как снизить погрешности обработки заготовок, вызываемые влиянием остаточных напряжений?

16. Как снизить погрешности обработки заготовок, порождаемые неточностью мерных режущих инструментов?

17. Из каких составляющих складывается погрешность установки заготовок?

18. Как снизить погрешность установки заготовок?

19. Как сказывается погрешность установки на точности обработки заготовок?

20. В чем состоит сущность установки заготовок с выверкой? Когда ее используют?

21. Что представляет собой рабочий настроечный размер и как его определяют?

22. Почему метод пробных ходов обеспечивает более высокую точность обработки по сравнению с обработкой на настроенном станке?

23. В чем состоит цель настройки технологической системы на обработку партии заготовок?

24. Какими способами можно обеспечить выполнение настройки технологической системы?

25. Что такое технологическая наследственность? Приведите пример ее проявления при изготовлении деталей.

5. ПОВЫШЕНИЕ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ

Основными критериями технико-экономической эффективности изготовления деталей являются производительность труда и их себестоимость. Рассмотрим основные пути повышения производительности и снижения себестоимости.

5.1. Технологические пути повышения производительности обработки заготовок

5.1.1. Сокращение штучного времени

Основную долю штучного времени составляет оперативное время, равное сумме основного и неперекрываемого им вспомогательного времени. Поэтому штучное время главным образом может быть снижено за счет уменьшения основного времени, непосредственного уменьшения вспомогательного времени, а также за счет его перекрытия основным временем.

Основное время, определяемое для каждого перехода зависимостью

$$t_{\text{о}} = \frac{Li}{S_{\text{м}}},$$

можно сократить путем уменьшения расчетной длины обработки L, числа рабочих ходов i и увеличения минутной подачи $S_{\text{м}}$.

Рис. 5.1. Схема фрезерования заготовки торцовыми фрезами

В свою очередь, расчетная длина обработки может быть снижена:

- уменьшением длины врезания;
- переходом от обработки с продольной к обработке с поперечной подачей (методом врезания);
- совмещением переходов, т. е. одновременным (параллельным) выполнением простых переходов.

На рис. 5.1. показана схема фрезерования плоскости заготовки торцовыми фрезами. Из нее видно, что увеличение диаметра фрезы позволяет существенно снизить длину врезания ($l''_{вр} < l'_{вр}$) и, тем самым, сократить $t_о$.

Гораздо более значительного снижения расчетной длины обработки и основного времени можно достичь, если, например, перейти от точения поверхности заготовки с продольной подачей, осуществляемого проходным резцом, к точению методом врезания, выполняемому фасонным резцом (рис. 5.2.).

Рис. 5.2. Схемы обтачивания заготовки проходным (а) и фасонным (б) резцами

Рис. 5.3. Схемы обработки заготовок с совмещением переходов: а – на вертикально-сверлильном станке, оснащенном многошпиндельной головкой; б – на токарном станке с продольным и поперечным суппортами

Для снижения расчетной длины обработки и основного времени широко используют совмещение переходов. Последние могут выполняться как одинаковыми (рис. 5.3, *а*), так и различными (рис. 5.3, *б*) инструментами. При одновременном сверлении одинаковых отверстий в заготовке с помощью многошпиндельной сверлильной головки (рис. 5.3, *а*) расчетная длина обработки и основное время снижаются пропорционально их числу. При одновременной токарной обработке разных поверхно-

стей заготовки различными инструментами, размещенными в разных суппортах станка (рис. 5.3, *б*), расчетная длина обработки и основное время уменьшаются до расчетной длины и основного времени лимитирующего перехода.

Необходимо отметить, что обработке методом врезания и совмещению переходов часто препятствует недостаточная жесткость технологической системы и, прежде всего, малая жесткость обрабатываемых заготовок. Поэтому во многих случаях приходится отказываться от применения метода врезания, а обработку различных поверхностей заготовок вести только последовательно.

Для сокращения основного времени за счет уменьшения числа рабочих ходов необходимо снижать припуски на обработку и напуски. Это обеспечивается использованием исходных заготовок, которые по форме и размерам максимально приближены к готовой детали. Причем уменьшение припусков важно как при предварительной обработке заготовок, так и при окончательной, например при внутреннем шлифовании, которое характеризуется малой подачей круга на глубину и большим числом рабочих ходов.

Одним из основных путей снижения основного времени является использование высокопроизводительных режущих инструментов, позволяющих увеличить скорость резания и (или) подачу на оборот (двойной ход) заготовки или инструмента и таким образом повысить минутную подачу.

Большую часть штучного времени может составлять вспомогательное время. В ряде случаев, например, при круглом шлифовании на универсальных круглошлифовальных станках, оно оказывается в несколько раз больше основного времени.

Непосредственное сокращение вспомогательного времени обеспечивается:

- применением установочных приспособлений с быстродействующими механизированными приводами (пневматическим, гидравлическим, электромагнитным и др.), которые позволяют снизить время на установку и снятие заготовки со станка;
- уменьшением времени на управление оборудованием и приспособлениями путем рационального размещения органов управления, его механизации и автоматизации, повышения скоростей холостых перемещений рабочих органов оборудования;
- уменьшением времени на измерения обрабатываемых заготовок за счет применения высокопроизводительных средств измерения.

Значительно снизить как основное, так и вспомогательное время позволяет многоместная обработка заготовок, при которой на станок устанавливают от двух до нескольких десятков заготовок.

Рис. 5.4. Схема многоместной последовательной обработки заготовок

На рис. 5.4 приведена схема многоместной последовательной обработки заготовок (обтачивания колец). В этом случае величина врезания, подвода и схода инструмента уменьшается пропорционально числу заготовок, что обеспечивает снижение основного времени. Заметно сокращается и вспомогательное время, расходуемое на установку заготовок и управление станком.

При многоместной многоинструментной параллельной обработке заготовок (рис. 5.5) становится возможным совмещение переходов. При этом основное время уменьшается до основного времени лимитирующего перехода, отнесенного к числу заготовок, а также обеспечивается сокращение указанных выше составляющих вспомогательного времени.

Рис. 5.5. Схема многоместной параллельной обработки заготовок

Многоместные схемы обработки дают возможность перекрыть вспомогательное время основным, что невозможно при одноместной обработке.

В простейшем случае это достигается при так называемой «маятниковой» обработке, когда, например, на столе вертикально-фрезерного станка размещают два приспособления для установки заготовок (рис. 5.6). Пока идет обработка заготовки, установленной в одном приспособлении, ранее обработанная заготовка снимается с другого приспособления и заменяется следующей подлежащей обработке заготовкой.

Наиболее полно вспомогательное время перекрывается основным на станках с непрерывно вращающимся столом или барабаном. На рис. 5.7 показана схема торцового фрезерования заготовок на двухшпиндельном вертикально-фрезерном станке с непрерывно вращающимся столом. Установленные в шпинделях *I* и *II* фрезы осуществляют соответственно черновое и чистовое фрезерование заготовок. Их установка и снятие выполняются в загрузочной зоне станка без его остановки.

Рис. 5.6. Схема «маятникового» фрезерования заготовок.
1 – приспособление; 2 – заготовка

Многоместная обработка с совмещением переходов эффективно реализуется на многошпиндельных полуавтоматах и автоматах, агрегатных многошпиндельных и многопозиционных станках и автоматических линиях.

Рис. 5.7. Схема многоместной параллельно-последовательной обработки с непрерывной установкой заготовок

В качестве примера на рис. 5.8 дана схема обработки заготовки на токарном четырехшпиндельном горизонтальном прутковом автомате. Каждая заготовка последовательно проходит по рабочим позициям *I–IV*, на которых с помощью ряда инструментов, установленных в продольном и поперечных суппортах, осуществляется несколько совмещенных во времени технологических переходов. При повороте шпиндельного блока автомата на 90° с него сходит очередная обработанная заготовка.

Рис. 5.8. Схема обработки заготовки на токарном четырехшпиндельном горизонтальном прутковом автомате

5.1.2. Сокращение подготовительно-заключительного времени. Групповая обработка

Как отмечалось выше, при обработке заготовок партиями норма времени на операцию складывается из штучного времени $t_{ш}$ и нормы подготовительно-заключительного времени $t_{пз}$, отнесенной к объему n партии

$$H_{вр} = t_{ш} + \frac{t_{пз}}{n}.$$

В соответствии с этой формулой долю подготовительно-заключительного времени на выполнение операции можно сократить путем или непосредственного уменьшения $t_{пз}$, или увеличения объема n партии.

Напомним, что подготовительно-заключительное время расходуется на ознакомление рабочего с заданием (чертежом, технологической документацией, получением инструктажа от мастера), установку на станке инструментов и приспособлений, кулачков, копиров, сменных зубчатых колес, размерную настройку станка, обработку пробных заготовок, снятие приспособлений и инструментов со станка, сдачу обработанных заго-

товок, остатков материала, приспособлений, инструментов, технологической документации и наряда.

Уменьшению затрат времени на ознакомление с заданием способствует ясно написанный технологический процесс и легко читаемый чертеж.

Сокращение затрат времени на установку приспособлений и инструментов на станке обеспечивается путем использования метода взаимозаменяемости. Например, для установки приспособления на столе фрезерного станка с необходимой точностью эти приспособления оснащают направляющими шпонками, которые входят в центральный паз стола, выполняемый по *H*7 или *H*8.

Для снижения затрат времени на размерную настройку технологической системы широко используют сменные резцедержатели, револьверные головки и сменные инструментальные магазины с заранее настроенными инструментами. На агрегатных станках, предназначенных для обработки заготовок нескольких типоразмеров, сменными выполняют шпиндельные коробки.

Одним из важнейших путей сокращения подготовительно-заключительного времени является *групповая обработка*, научные основы которой разработаны проф. С.П. Митрофановым. Суть групповой обработки состоит в следующем. Изготавливаемые на предприятии детали, близкие по габаритам, массе, материалу, точности и качеству поверхностных слоев и допускающие обработку на одном оборудовании, объединяют в группы. Для каждой группы деталей проектируют единый (групповой) технологический процесс, инструментальные наладки и групповые приспособления, преследуя цель до минимума сократить подготовительно-заключительное время при переходе от обработки одной детали группы к другой и соответствующие простои оборудования.

В результате при тщательном отборе деталей в группу, хорошо продуманном групповом технологическом процессе и рациональных конструкциях групповых приспособлений, требующих минимальных переналадок при переходе к обработке очередной детали группы, удается приблизить непоточное серийное производство к поточному массовому.

Важно, что при переходе к групповой обработке во многих случаях оказывается экономически оправданным применение более производительного оборудования, в том числе переналаживаемых автоматических линий.

Наиболее простым является осуществление групповых операций. На рис. 5.9 приведен пример фрагмента групповой наладки восьмишпиндельного токарного полуавтомата для обработки заготовок трех типов. В этом случае автомат оснащают поворотными инструментальными плитами (резцедержателями). На каждой стороне резцедержателя установлены инструменты для обработки заготовок соответствующего типа. При

обработке заготовки *1* эти резцедержатели на всех позициях станка переводятся в первое положение (инструменты для обработки заготовок *2* и *3* находятся в нерабочем положении). Для перехода к обработке следующей заготовки (*2* или *3*) необходимо только повернуть резцедержатели и использовать для установки этой заготовки соответствующие поверхности фасонных кулачков патрона.

Рис. 5.9. Пример фрагмента групповой наладки восьмишпиндельного полуавтомата для обработки трех заготовок: 1–3 – заготовки; 4 – фиксатор

Нужно подчеркнуть, что в группу, особенно при построении групповых операций, могут объединяться детали, различающиеся по конструкции, но допускающие обработку на одном и том же станке. Пример группы таких деталей приведен на рис. 5.10.

При проектировании групповых технологических процессов после отбора деталей в группу выделяется их типовой представитель или формируется комплексная деталь. *Деталь-типовой представитель* должна иметь все поверхности, которые содержат детали группы. Обычно в качестве типового представителя берут наиболее сложную деталь группы. Если детали, которая может быть принята в качестве типового представителя, в группе нет, то создают искусственную *комплексную деталь*, содержащую все поверхности деталей группы. Пример формирования комплексной детали для группы деталей приведен на рис. 5.11.

Рис. 5.10. Пример деталей, объединяемых в группу для выполнения групповой операции

Рис. 5.11. Формирование комплексной детали: а–з – детали группы; и – комплексная деталь. 1–7 – элементарные обрабатываемые поверхности

Для детали – типового представителя или комплексной детали – проектируют технологический процесс и инструментальные наладки станков.

Обработка конкретных деталей группы может вестись с пропуском отдельных операций или переходов группового технологического процесса.

5.2. Снижение себестоимости изготовления деталей

5.2.1. Многостаночное обслуживание

Обслуживание рабочим нескольких станков позволяет повысить производительность его труда и снизить расходы на заработную плату. Многостаночное обслуживание становится возможным, если при выполнении операции основное время, являющееся машинным, достигает значительных величин. В это время рабочий оказывается не занятым на одном станке и может выполнять работы на других станках.

Вспомогательное время при многостаночном обслуживании делится на два вида: вспомогательное перекрывающееся ($t_{вп}$) и вспомогательное неперекрывающееся ($t_{вн}$). Под $t_{вп}$ понимается вспомогательное время, перекрываемое основным (машинным) временем $t_{ом}$ на одном станке, под $t_{вн}$ – вспомогательное время, которое не перекрывается $t_{ом}$ на одном станке.

Во вспомогательное время, кроме указанных затрат времени, входит также время на переходы рабочего от одного станка к другому ($t_{пер}$).

Время технического обслуживания ($t_т$), организационного обслуживания ($t_{орг}$) и время на личные потребности ($t_п$) при многостаночном обслуживании составляют дополнительное время ($t_д$):

$$t_д = t_т + t_{орг} + t_п,$$

которое планируется на рабочую смену.

Рис. 5.12. Циклограмма многостаночной работы при полном использовании основного (машинного) времени

Рассмотрим циклограмму многостаночной работы на станках-дублерах (рис. 5.12), т. е. одинаковых станках, на которых выполняется одна и та же операция. На первом станке рабочий снимает ранее обработанную заготовку, устанавливает следующую и включает станок. Затраты времени на эти действия образуют вспомогательное неперекрывающееся время ($t_{вн}$). Затем рабочий измеряет снятую со станка заготовку, затрачивая на это вспомогательное перекрывающееся время ($t_{вп}$) и переходит ко второму станку и т. д. К моменту окончания обработки заготовки на первом станке рабочий возвращается к нему. Далее циклы многостаночной работы повторяются.

Длительность цикла ($T_ц$) при многостаночной работе, т. е. периода времени, в течение которого выполняются одни и те же действия на всех станках, как видно из рис. 5.12, составляет

$$T_ц = t_{ом} + t_{вн}.$$

Основное (машинное) время будет полностью использовано при

$$t_{ом} = t_{вн}(N-1) + (t_{вп} + t_{пер})N,$$

где N – число обслуживаемых станков.

Отсюда

$$N = \frac{t_{ом} + t_{вн}}{t_{вн} + t_{вп} + t_{пер}}.$$

Норма выработки в смену при обслуживании N станков-дублеров

$$H_{выр} = N\frac{T_{см} - t_д}{T_ц},$$

где $T_{см}$ – продолжительность рабочей схемы.

Рассмотренная циклограмма многостаночной работы является идеализированной. В действительности добиться такой циклограммы трудно. Поэтому обычно при работе на простых недорогих станках обеспечивается полная занятость рабочего при некоторых простоях станков. При работе на дорогостоящем оборудовании, наоборот, исключаются его простои, в то время как рабочий оказывается загружен не полностью.

Необходимо отметить, что на практике во многих случаях многостаночное обслуживание организуется таким образом, что рабочий обслуживает станки (одной группы), на которых выполняются разные операции, или даже станки, которые относятся к различным группам, например, токарные и фрезерные.

5.2.2. Сокращение расходов на материалы

Значительную долю в себестоимости деталей составляют расходы на материалы. Сокращение этих расходов может быть достигнуто:

- максимальным приближением исходной заготовки к готовой детали;
- экономным использованием дорогостоящих материалов;
- получением отходов при обработке заготовок в наиболее ценном виде, который допускает их использование для изготовления других деталей.

Использование исходных заготовок, близких по форме и размерам к готовой детали, позволяет не только снизить расходы на материалы, но и уменьшить объем обработки резанием и связанные с ней затраты.

Для экономии дорогостоящих материалов детали выполняют составными. Например, подшипниковую втулку делают биметаллической (внутренняя часть из цветного металла, наружная – из конструкционной стали). Составными выполняют многие режущие инструменты (сверла, концевые фрезы и др.). Их рабочую часть из быстрорежущей стали или твердого сплава соединяют с хвостовиком из конструкционной стали путем сварки или пайки.

Значительную экономию материала дает рациональный раскрой листов. На рис. 5.13 показано, как путем небольшого изменения конструкции детали (от приведенной на рис. 5.13, *а* к приведенной на рис. 5.13, *б*) можно существенно сократить отходы при раскрое листов.

а *б*

Рис. 5.13. Схема влияния конструкции детали на величину отходов при раскрое листов

Примером получения отходов в наиболее ценном виде может служить обработка отверстий заготовок кольцевым сверлом (рис. 5.14). Такие сверла применяют для получения отверстий диаметром 70…200 мм и более. Образующийся при сверлении стержень используют для изготовления других деталей. Следует отметить, что при сверлении кольцевыми сверлами не только может быть достигнута экономия материала, но и существенно увеличена производительность обработки, а также снижены затраты на электроэнергию и инструмент.

Рис. 5.14. Схема сверления отверстия кольцевым сверлом

5.2.3. Снижение затрат на технологическую подготовку производства деталей. Типизация технологических процессов

Затраты на технологическую подготовку производства (ТПП) деталей могут составлять существенную долю в их себестоимости. ТПП деталей включает в себя разработку технологических процессов их изготовления, проектирование и изготовление технологической оснастки, организацию контроля и управления технологическими процессами.

Одним из основных путей снижения затрат времени и средств на проектирование технологических процессов изготовления деталей и технологической оснастки является широкое использование типовых технологических процессов.

Идею типизации технологических процессов изготовления деталей высказал в 30-х годах XX века проф. А.П. Соколовский. В соответствии с этой идеей детали машин по общности конструкции и технологии изготовления делят на классы (валы, зубчатые колеса, кронштейны, рычаги, втулки и др.). Каждый класс разбивают на подклассы, группы, подгруппы и типы. Пример классификации деталей (кронштейнов) приведен на рис. 5.15.

Для деталей каждого типа с учетом производственных условий (тип производства) разрабатывается типовой технологический процесс. При этом устанавливается вид исходной заготовки, типаж применяемого оборудования, последовательность и содержание операций обработки заготовок, схемы их базирования и применяемая технологическая оснастка. Степень детализации типового технологического процесса может быть разной и зависит от степени унификации деталей, отнесенных к данному типу. При высокой степени унификации деталей типовой технологический процесс содержит всю необходимую информацию для изготовления деталей данного типа. В противном случае типовой технологический процесс может быть представлен в виде перечня последовательно выполняемых операций с указанием моделей станков (маршрутный типовой технологический процесс). Этот технологический процесс служит информационной основой для разработки операционного технологического процесса изготовления конкретной детали данного типа.

Рис. 5.15. Пример классификации деталей

Типовые технологические процессы разрабатывают в масштабах отрасли или предприятия на основе анализа и обобщения опыта передовых машиностроительных заводов. В этих технологических процессах используют наиболее эффективные и надежные технологические решения, проверенные в производственных условиях.

Проектирование технологического процесса изготовления конкретной детали на базе типового технологического процесса позволяет значительно сократить сроки и затраты на проектирование, а также существенно повысить качество проектных работ. Вместе с тем следует иметь в виду, что в типовых технологических процессах отражен прошлый опыт. Поэтому типовые технологические процессы по мере развития технологии машиностроения необходимо периодически корректировать.

Наиболее широкое применение типовые технологические процессы нашли в условиях крупносерийного и массового производства.

Резкое сокращение сроков и затрат на проектирование технологических процессов и технологической оснастки дает применение автоматизированных систем их проектирования, основанных в значительной степени на использовании типовых технологических процессов. Важно, что при этом не только уменьшаются издержки производства, но и обеспечивается более высокое, чем при ручном проектировании качество проектных решений и снижаются затраты времени и средств на доработку и освоение технологических процессов в производстве.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Как сократить основное время при обработке заготовок?
2. Как влияет жесткость технологической системы на возможность совмещения переходов при обработке заготовок?
3. Как сократить вспомогательное время при обработке заготовок?
4. Что дает многоместная обработка заготовок?
5. Как сократить подготовительно-заключительное время при обработке заготовок?
6. Какова суть групповой обработки?
7. Каковы пути сокращения расходов на материалы?
8. Когда возможно многостаночное обслуживание и что оно обеспечивает?
9. Какова суть типизации технологических процессов и что она дает?

6. ОСНОВЫ РАЗРАБОТКИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛИ

6.1. Общие положения. Принципы и последовательность разработки технологического процесса

Виды технологических процессов. Их делят на основные виды по следующим признакам:

- форме организации технологического процесса, определяемой числом охватываемых предметов производства;
- освоенности технологического процесса в конкретных производственных условиях.

В зависимости от формы организации технологического процесса различают три его вида:

- единичный;
- типовой;
- групповой.

Единичный технологический процесс – это процесс изготовления или ремонта изделия одного наименования, типоразмера и исполнения, независимо от типа производства.

Типовой технологический процесс – это процесс изготовления группы изделий с общими конструктивными и технологическими признаками.

Групповой технологический процесс – это процесс изготовления изделий с разными конструктивными, но общими технологическими признаками.

В зависимости от освоенности в производстве различают два вида технологического процесса:

- рабочий;
- перспективный.

Рабочим технологическим процессом называется процесс изготовления одного или нескольких изделий по принятой в производстве рабочей технологической документации.

Перспективным технологическим процессом называется процесс, соответствующий современным достижениям науки и техники, который предстоит освоить на предприятии (используется как информационная основа для разработки рабочих технологических процессов при технологическом и организационном перевооружении производства).

В зависимости от сложности изделий, их стоимости и типа производства используют различное по степени детализации описание технологического процесса:

- маршрутное;
- операционное;
- маршрутно-операционное.

При *маршрутном описании технологического процесса* дается сокращенное описание всех технологических операций в маршрутной карте в последовательности их выполнения без указания переходов и технологических режимов.

При *операционном описании технологического процесса* дается полное описание всех технологических операций в последовательности их выполнения с указанием переходов и технологических режимов.

При *маршрутно-операционном описании технологического процесса* дается сокращенное описание операций технологического процесса в маршрутной карте в последовательности их выполнения с полным описанием отдельных операций в других технологических документах.

В соответствии с принятым описанием технологического процесса принято различать маршрутный, операционный и маршрутно-операционный технологический процессы.

Маршрутное и маршрутно-операционное описание технологического процесса используют при единичном и мелкосерийном производствах, операционное – преимущественно при среднесерийном, крупносерийном и массовом производствах. При изготовлении крупных (дорогих) деталей операционное описание технологического процесса применяют и в единичном, и мелкосерийном производствах.

Ниже преимущественно будем рассматривать разработку единичного операционного технологического процесса изготовления детали.

Разработка такого технологического процесса имеет целью дать подробное описание всех этапов изготовления детали с технико-экономическими расчетами и обоснованием принятых решений. В результате составления технологической документации инженерно-технические работники и рабочие получают всю необходимую информацию для реализации разработанного технологического процесса на предприятии. При разработке технологического процесса определяют средства технологического оснащения (оборудование, приспособления, режущий и измерительный инструменты), трудоемкость и себестоимость изготовления деталей. Это служит основой для организации снабжения основными и вспомогательными материалами, календарного планирования производства, технического контроля, инструментального и транспортного обеспечения, а также для определения производственных площадей, необходимых энергетических ресурсов и рабочей силы.

Следует различать разработку технологических процессов для действующих предприятий и для вновь проектируемых (реконструируемых).

В первом случае необходимость разработки технологических процессов изготовления деталей возникает при освоении в производстве нового или усовершенствованного изделия, а также при производстве уже освоенных изделий для повышения технико-экономических показателей изготовления деталей на базе внедрения современных достижений науки и техники. Во втором случае разработанные на основе этих достижений технологические процессы изготовления деталей являются основой всего проекта нового (реконструируемого) предприятия.

Принципы проектирования технологического процесса. Проектирование технологических процессов производят на основе двух принципов: технического и экономического. В соответствии с техническим принципом технологический процесс изготовления детали должен обеспечивать все предъявленные к ней технические требования. Эти требования могут быть выполнены при нескольких вариантах технологического процесса, отличающихся, например, методом получения исходной заготовки, применяемыми для ее последующей обработки станками и инструментами и т. д. В соответствии с экономическим принципом принятый вариант технологического процесса должен быть наиболее экономичным.

Исходные данные и последовательность разработки технологического процесса изготовления детали. Исходную информацию, необходимую для разработки технологического процесса изготовления детали, делят на базовую, справочную и руководящую.

При разработке технологического процесса для новых предприятий или производств базовыми исходными данными являются: рабочий чертеж детали; чертеж сборочной единицы, в которую входит деталь; объем выпуска деталей.

При разработке технологического процесса для действующих заводов в дополнение к этим базовым исходным данным необходимо располагать сведениями об имеющемся оборудовании, приспособлениях, инструментах, производственных площадях и других производственных условиях. При этом технолог в своих решениях зачастую вынужден ориентироваться преимущественно на применение имеющихся на предприятии средств технологического оснащения.

Справочная информация представляет собой каталоги и паспорта технологического оборудования, альбомы приспособлений, стандарты и нормали на режущий и измерительный инструменты, нормативы по точности обработки и качеству поверхностных слоев заготовок, расчету припусков, режимов резания, норм времени, тарифно-квалификационные справочники и др.

К руководящей информации относят данные о перспективных технологических процессах в отрасли, стандарты на технологические про-

цессы и технологическую документацию, основные требования по состоянию и перспективам развития производства на предприятии.

Технологический процесс изготовления детали разрабатывают в определенной последовательности.

1. Проводят анализ технических требований к детали, выясняют возможность их обеспечения и контроля в условиях данного предприятия, выявляют наиболее сложные технологические задачи, возникающие при изготовлении детали.

2. Определяют тип производства и форму его организации (метод работы).

3. Осуществляют технологический контроль чертежа детали на предмет соответствия ее конструкции требованиям технологичности для условий данного предприятия.

4. Выбирают вид исходной заготовки и метод ее получения.

5. Производят выбор технологических баз.

6. Устанавливают маршруты обработки поверхностей детали, т. е. последовательность переходов для достижения требуемых по чертежу параметров их точности и качества поверхностных слоев.

7. Составляют маршрут изготовления детали, выбирают средства технологического оснащения и проектируют операции технологического процесса.

8. Выполняют размерный анализ технологического процесса (определяют припуски на обработку и рассчитывают технологические размеры заготовки).

9. Определяют режимы резания.

10. Находят нормы времени или нормы выработки.

11. Определяют технико-экономические показатели технологического процесса.

12. Оформляют технологическую документацию.

6.2. Анализ технических требований чертежа детали и выявление технологических задач при ее изготовлении

Перед разработкой технологического процесса подробно изучают рабочие чертежи детали и изделия (сборочной единицы), в которые входит деталь. Выявляют функции детали и условия ее работы.

Рабочий чертеж должен давать исчерпывающее представление о детали. Он должен содержать достаточное количество проекций, разрезов и видов; на нем должны быть указаны все необходимые размеры (с предельными отклонениями), допуски формы и расположения поверхностей, параметры их шероховатости, волнистости, вид термической или химико-термической обработки, вид покрытия, твердость материала, а также спе-

цифические технические требования (например, допустимая степень неуравновешенности детали).

Приведенные в чертеже технические требования рассматривают со следующих позиций:

- обоснованности их назначения конструктором (например, устанавливают, не завышены ли эти требования, правильно ли проставлены размеры и т. п.);
- возможности обеспечения известными и имеющимися на предприятии средствами технологического оснащения;
- возможности контроля известными методами и средствами.

Так, если анализируемый размер детали является составляющим звеном конструкторской размерной цепи, то, вскрыв ее, можно оценить, правильно ли назначен допуск на этот размер.

При анализе технических требований выявляют технологические задачи, возникающие при изготовлении детали. Для этого выделяют комплексы поверхностей, к которым предъявляются наиболее высокие требования по точности размеров, формы и расположения и качеству поверхностных слоев. Указанные требования определяют выбор технологических баз и способов установки заготовки, заключительные методы и маршрут ее обработки в целом, необходимые средства технологического оснащения. Например, для ступенчатого вала важной технологической задачей является обеспечение высокой точности размеров, формы и расположения его посадочных шеек. Для внутреннего кольца подшипника такой задачей является получение высокой точности размера и формы дорожки качения, малых значений высотных параметров шероховатости и волнистости ее поверхности, минимального радиального биения дорожки качения относительно посадочного отверстия.

Разработка технологического процесса для действующего предприятия предполагает тщательное изучение производственных условий. Устанавливают наличие производственных площадей и оборудования для изготовления детали, определяют возможности модернизации оборудования и расширения производственных площадей для увеличения объема выпуска деталей, выясняют возможности предприятия по применению новых методов получения исходных заготовок и их последующей обработки, прогрессивных режущих инструментов и т. п.

Для действующих предприятий анализируется возможность изготовления данной детали по имеющимся на предприятии типовым или групповым технологическим процессам. При отсутствии такой возможности приступают к проектированию единичного технологического процесса изготовления детали.

6.3. Определение типа производства

От типа производства зависят: форма его организации (метод работы); вид и способ получения исходной заготовки; типаж применяемого при ее обработке оборудования, приспособлений и инструментов; степень детализации разработки самого технологического процесса изготовления детали.

На стадии разработки технологического процесса изготовления детали тип производства может быть определен только ориентировочно. При этом можно руководствоваться данными табл. 6.1.

Таблица 6.1

Зависимость типа производства от объема выпуска, шт., и массы детали

Масса детали, кг	Тип производства				
	Единичное	Мелкосерийное	Среднесерийное	Крупносерийное	Массовое
< 1,0	< 10	10…1500	1500…100000	75000…200000	200000
1,0…2,5	< 10	10…1000	1000…50000	50000…100000	100000
2,5…5,0	< 10	10…500	500…35000	35000…75000	75000
5,0…10	< 10	10…300	300…25000	25000…50000	50000
> 10	< 10	10…200	200…10000	10000…25000	25000

Тип производства оценивают также по коэффициенту закрепления операций K_{30}, определение которого, а также значения для различных типов производства даны в разд. 1.

При разработке технологического процесса изготовления детали коэффициент закрепления операций находят по формуле

$$K_{30} = \frac{t_{\text{д}}}{t_{\text{шс}}},$$

где $t_{\text{д}}$ – такт выпуска деталей; $t_{\text{шс}}$ – среднее штучное время операций.

Такт выпуска деталей определяется, как это уже отмечалось, по формуле $t_{\text{д}} = 60\Phi_{\text{д}} / N$, где $\Phi_{\text{д}}$ – действительный годовой фонд времени работы оборудования, ч; N – годовой объем выпуска деталей.

Для определения среднего штучного времени можно воспользоваться данными из существующего на производстве технологического процесса изготовления аналогичной детали или выполнить укрупненное нормирование разрабатываемого технологического процесса. Среднее штучное время рассчитывают по формуле

$$t_{\text{шс}} = \sum_{i=1}^{n} t_{\text{ш}i} / n,$$

где $t_{шс}$ – штучное время i-й операции изготовления детали; n – число основных операций в технологическом процессе.

При подсчете $t_{шс}$ следует брать только основные операции, исключая, например, операции термообработки, удаления заусенцев, маркирования и промывки деталей.

Тип производства, найденный по коэффициенту закрепления операций, сравнивают с его типом, установленным по табл. 6.1. При их несовпадении тип производства считают таким, который соответствует подсчитанному значению коэффициента закрепления операций.

После установления типа производства определяют метод работы (поточный или непоточный). Возможность использования поточного метода работы определяют по коэффициенту загрузки $K_{заг}$ рабочих мест

$$K_{заг} = \frac{t_{шс}}{t_{д}}.$$

При коэффициенте загрузки рабочих мест $K_{заг} > 0,6$ принимают поточный метод работы.

6.4. Технологический контроль чертежа детали

Технологический контроль чертежа детали, как отмечалось в разд. 1, технолог выполняет для оценки соответствия конструкции детали требованиям технологичности с учетом типа производства и его конкретных условий, в частности, технологических возможностей и особенностей оборудования.

Общие требования по технологичности детали можно сформулировать следующим образом.

Деталь должна представлять собой сочетание поверхностей простых форм. Она в максимальной степени должна состоять из стандартных и унифицированных конструктивных элементов (резьбы, канавки, выточки, модули, размеры шлицев, шпоночных пазов и т. д.) или быть стандартной в целом. Это создает предпосылки для унификации применяемых при изготовлении и ремонте деталей режущих и измерительных инструментов.

Деталь должна обладать достаточной жесткостью, иметь надежные технологические базы, допускать удобный подвод высокопроизводительного режущего инструмента ко всем обрабатываемым поверхностям и его свободный выход, что в совокупности позволяет осуществить высокопроизводительную обработку.

Параметры точности детали и качество поверхностных слоев должны быть строго обоснованы ее функциональным назначением. Завышенные требования по этим параметрам приводят к необходимости введения

дополнительных технологических операций, удлиняют цикл обработки, увеличивают трудоемкость изготовления детали и повышают ее себестоимость.

Для снижения объемов обработки резанием необходимо сокращать длину обрабатываемых поверхностей деталей и повышать точность исходных заготовок, приближая их к готовым деталям.

Простановка размеров детали (конструкторских размеров) должна производиться с учетом технологических требований и обеспечивать:

- совмещение конструкторских, технологических и измерительных баз;
- работу на настроенных станках;
- применение наиболее простых приспособлений, режущих и измерительных инструментов;
- надежность и простоту контроля размеров детали;
- отсутствие необходимости в пересчете размеров при изготовлении и контроле;
- рациональную последовательность изготовления детали.

Например, на рабочих чертежах деталей, получаемых из поковок и отливок с обработкой отдельных поверхностей резанием, должны быть указаны три группы размеров (см. рис. 6.1). Одна из них связывает между собой необрабатываемые (резанием) поверхности и используется в заготовительных цехах (размеры 20 и 10 на рис. 6.1, *а*); вторая связывает обрабатываемые поверхности (размер 40 на рис. 6.1, *а*); третья группа размеров по каждому координатному направлению должна содержать только один размер, связывающий систему обрабатываемых поверхностей с системой необрабатывамых (размер 10* на рис. 6.1, *а*).

Рис. 6.1. Варианты простановки размеров детали (обрабатываемые резанием поверхности выделены жирными линями): а – правильно; б – неправильно

Если указанное требование нарушить и проставить размеры так, как показано на рис. 6.1, *б*, то при подрезке левого торца детали непосредственно будет выдержан только один из размеров (например, 10*). Два других размера (20 и 30) будут при этом получаться в виде замыкающих звеньев в технологических размерных цепях; точность этих размеров будет значительно ниже точности размеров исходной заготовки.

Если деталь подвергается термической или химико-термической обработке, то она должна иметь симметричную конфигурацию без острых граней, тонких перемычек и резких переходов от одного сечения к другому; шероховатость поверхностей должна соответствовать $Ra \leq 10$ мкм. При несоблюдении этих требований при закалке возможно образование трещин и разрушение заготовки.

Некоторые примеры технологичных и нетехнологичных конструктивных элементов деталей представлены в табл. 6.2 [16].

Таблица 6.2

Примеры технологичных и нетехнологичных конструкций

Основные технологические требования	Конструкция		Преимущества технологичной конструкции
	нетехнологичная	технологичная	
Обрабатываемые плоскости не должны быть сплошными			1. Уменьшение расхода режущих инструментов. 2. Повышение точности обработки и снижение шероховатости поверхности. 3. Снижение трудоемкости
Обрабатываемые плоскости следует располагать на одном уровне			1. Возможность обработки за один рабочий ход производительными методами – торцевым фрезерованием, плоским шлифованием и протягиванием. 2. Возможность обработки нескольких заготовок одновременно. 3. Упрощение контроля
Обрабатываемые плоскости должны быть открытыми. Узкие и длинные поверхности должны быть расположены так, чтобы их можно было обрабатывать вдоль плоскости			1. Возможность обработки торцевым фрезерованием. 2. Повышение производительности и точности обработки

Основные технологические требования	Конструкция		Преимущества технологичной конструкции
	нетехнологичная	технологичная	
Обрабатываемые плоскости не должны располагаться в углублениях			1. Применение производительных методов обработки. 2. Снижение трудоемкости
В ступенчатых отверстиях наиболее точную ступень следует делать сквозной	DH12 DH7	DH7 DH12	1. Снижение трудоемкости обработки. 2. Повышение точности обработки и стойкости инструмента. 3. Упрощение конструкции инструмента
Шлицевые отверстия должны быть непрерывными			1. Предохранение инструмента от поломок и повышение его стойкости. 2. Снижение трудоемкости обработки отверстий
Следует избегать глухих шлицевых отверстий			Возможность обработки отверстия производительным методом – протягиванием
В отверстиях не должно быть обрабатываемых выточек			1. Снижение трудоемкости. 2. Возможно применение производительных методов обработки
Следует обеспечить условия для наилучшего направления инструмента			1. Повышение точности обработки. 2. Увеличение жесткости инструмента. 3. Повышение производительности
Возможность нормального входа и выхода режущего инструмента	1 2 3 4	1 2 3 4	1. Предохранение инструмента от поломок. 2. Повышение точности сверления. 3. Повышение производительности

Окончание табл. 6.2

Основные технологические требования	Конструкция		Преимущества технологичной конструкции
	нетехнологичная	технологичная	
Отверстия должны быть расположены так, чтобы можно было работать инструментом нормальной длины			1. Применение нормализованного инструмента и более полное его использование. 2. Повышение точности обработки
Глухие отверстия с резьбой должны иметь канавки для выхода инструмента, или в них должен быть предусмотрен сбег резьбы			1. Улучшение качества резьбы. 2. Улучшение условий работы инструмента. 3. Снижение трудоемкости
Конструкция отверстия с резьбой должна давать возможность работать резьбовым инструментом на проход			1. Повышение производительности. 2. Улучшение условий работы инструмента. 3. Применение инструмента, обладающего лучшими режущими свойствами
Следует избегать наклонного расположения оси отверстия			1. Упрощение конструкции приспособления. 2. Возможность одновременно обрабатывать другие отверстия при параллельном расположении осей. 3. Снижение трудоемкости
Следует избегать закрытых пазов, обрабатываемых концевыми фрезами			1. Применение более производительного инструмента. 2. Улучшение условий работы инструмента и особенно его врезания. 3. Снижение трудоемкости обработки
Следует избегать закрытых гнезд и несквозных пазов			1. Сокращение числа рабочих ходов. 2. Упрощение конструкции режущего инструмента. 3. Снижение трудоемкости обработки

Требованиям технологичности должны отвечать не только детали, но и исходные заготовки.

Отливки должны удовлетворять следующим основным требованиям:

- толщина стенок отливок должна быть по возможности одинаковой, что обеспечивает получение однородной структуры и уменьшение остаточных напряжений;
- форма любой отливки должна предусматривать простой, без затруднений разъем модели;
- поверхности отливки, расположенные перпендикулярно к плоскости разъема модели, должны иметь литейные уклоны для того, чтобы изготовление литейных форм и стержней и удаление моделей из форм происходило без затруднений.

Поковки, получаемые методами штамповки и ковки, должны соответствовать следующим требованиям:

- не должны иметь резких перепадов поперечных сечений;
- переходы от одного сечения к другому должны быть выполнены по дугам относительно больших радиусов;
- острые ребра у поковок, получаемых штамповкой, должны быть закруглены;
- указанные поковки должны иметь уклон поверхностей, расположенных перпендикулярно плоскости разъема штампа, необходимый для извлечения поковки из штампа.

Технологический контроль чертежа детали сводится к сопоставлению контролируемого конструкторского решения с некоторым решением, принятым за эталон. На основании такого сопоставления делается оценка типа «хорошо – плохо» или «рационально – нерационально». В качестве эталона для сравнительной оценки принимается: конструкция детали-аналога из числа находящихся в серийном производстве; нормативно-технологические требования к детали; личный опыт исполнителя, осуществляющего технологический контроль.

На основе технологического контроля составляется перечень замечаний и предложений по изменению элементов конструкции детали, который согласуется с конструктором. Последний, после анализа этого перечня, может внести соответствующие изменения в чертеж детали, направленные на повышение ее технологичности.

6.5. Выбор исходной заготовки

Исходные заготовки различают по виду, отражающему базовую технологию их изготовления. Выделяют следующие виды исходных заготовок:

- отливки;
- поковки, получаемые ковкой и штамповкой;

- прокат;
- сварные заготовки;
- заготовки, получаемые методами порошковой металлургии.

Исходные заготовки каждого вида могут быть получены одним или несколькими методами. Например, отливка может быть получена литьем в песчаные формы, под давлением, в кокиль и т. д.

Литьем получают заготовки практически любых размеров как простой, так и очень сложной конфигурации почти из всех металлов и сплавов.

Обработкой давлением (прокатка, ковка, штамповка) получают заготовки из металлов и сплавов, обладающих необходимой пластичностью.

Сварные заготовки получают из отдельных составных элементов, полученных из проката, литьем или штамповкой путем их сварки.

Методами порошковой металлургии получают заготовки, материал которых обладает специальными, часто уникальными физико-механическими свойствами (керамика, твердые сплавы и др.).

Выбор вида и метода получения исходной заготовки зависит от следующих факторов:

- требуемого уровня физико-химических свойств материала детали;
- технологических свойств материала детали;
- конструктивной формы, размеров и массы детали;
- типа производства (объема выпуска деталей);
- наличия технологического оборудования на предприятии (литейного, кузнечно-прессового, сварочного и др.), а также возможности и целесообразности размещения заказа на изготовление исходных заготовок на другом предприятии.

Определяющим при выборе вида и метода получения исходной заготовки является обеспечение требуемого уровня физико-химических свойств материала детали, который зависит от характера и интенсивности нагрузок на нее в процессе эксплуатации изделия. Например, если деталь работает в условиях больших динамических нагрузок, то для изготовления исходной заготовки, как уже отмечалось, преимущественно следует использовать методы обработки давлением, которые обеспечивают получение в целом более мелкозернистой структуры и более высокого уровня механических свойств материала детали (предел выносливости, ударная вязкость, предел прочности), чем традиционные методы литья.

Технологические свойства материала детали (литейные свойства, обрабатываемость давлением, свариваемость и др.) определяют возможность получения исходной заготовки литьем, обработкой давлением, с применением сварки и методов порошковой металлургии. Так, если материалом детали является серый чугун, то единственным видом исходной

заготовки может быть отливка. Если материал детали обладает низкой жидкотекучестью и высокой склонностью к усадке, то это исключает возможность получения исходной заготовки литьем под давлением или литьем в кокиль из-за быстрого охлаждения расплава и малой податливости литейных форм.

Очень существенное влияние на вид и метод получения исходной заготовки оказывает форма, размеры и масса детали. С увеличением размеров и массы детали арсенал возможных методов получения исходной заготовки сокращается. Так, стальной ступенчатый вал с диаметром наибольшей ступени 200 мм и общей длиной 2000 мм может быть изготовлен из круглого горячекатаного проката или из поковки, полученной свободной ковкой. При увеличении диаметра наибольшей ступени вала до 500 мм единственным методом получения исходной заготовки обработкой давлением становится свободная ковка. Такие эффективные методы, как литье под давлением, в кокиль, по выплавляемым моделям, горячая объемная штамповка, применимы лишь для изготовления исходных заготовок относительно небольшой массы. Например, штамповкой на горизонтально-ковочных машинах можно в основном получать поковки массой до 30 кг, литьем по выплавляемым моделям – стальные отливки массой до 150 кг, литьем в кокиль – стальные отливки массой до 4000 кг.

В значительной степени вид и метод получения исходной заготовки зависит от объема выпуска деталей (типа производства). С его увеличением экономически оправданным становится получение исходных заготовок, все в большей степени приближенных по форме и размерам к готовой детали. Если, например, для изготовления стальных ступенчатых валов средних размеров в единичном и мелкосерийном производствах широко используют круглый горячекатаный прокат, то в крупносерийном и массовом производствах изготовление таких валов ведут обычно из поковок, полученных горячей объемной штамповкой.

При разработке технологического процесса изготовления детали вопросы выбора метода получения исходной заготовки решаются совместно технологами заготовительного и механического цехов. При этом могут иметь место две ситуации:

- когда метод получения исходной заготовки задан конструктором, а технологи лишь уточняют его;
- выбор этого метода конструктор оставляет за технологами.

Первая ситуация характерна для массового, крупносерийного и среднесерийного производств, вторая – для единичного и мелкосерийного.

При выборе исходной заготовки конструктор опирается на результаты длительной совместной работы с технологами заготовительных и ме-

ханических цехов, направленной на создание такого метода ее получения, который бы обеспечил высокую надежность детали и одновременно наименьшую ее себестоимость. Такая работа охватывает различные испытания детали, исходные заготовки для которых изготовлены по разной технологии, и анализ опыта эксплуатации машины с учетом ее доработок и доводок. Изложенное характерно для большинства ответственных деталей, определяющих надежность машин (детали блока цилиндров, коленчатые и распределительные валы двигателей внутреннего сгорания, лопатки и диски газотурбинных двигателей и др.).

В случае самостоятельного решения вопроса о выборе метода получения исходной заготовки технологи заготовительного и механического цехов, учитывая указанные выше факторы, рассматривают несколько методов и выбирают из них такой, который обеспечивает наименьшую себестоимость детали.

Чем в большей степени форма и размеры исходной заготовки приближаются к форме и размерам детали, тем дороже эта заготовка в изготовлении, но тем проще и дешевле ее последующая обработка резанием и меньше расход материала. Таким образом, наименьшая себестоимость детали будет соответствовать минимуму суммарных затрат на изготовление исходной заготовки и ее последующую обработку.

Для получения точных и сложных исходных заготовок требуется сравнительно дорогая технологическая оснастка (сложные штампы или комплекты модельной оснастки), затраты на проектирование и изготовление которой могут оправдать себя лишь при достаточно большом объеме выпуска деталей.

Рис. 6.2. Вид исходных заготовок зубчатого колеса, полученных: а – ковкой; б – штамповкой в подкладных штампах; в – штамповкой в закрепленных штампах (пунктирными линиями показаны контура колеса) [15]

Так, исходные заготовки для зубчатого колеса из стали 18ХГТ (рис. 6.2) можно изготовить методами ковки (рис. 6.2, *а*), штамповки в подкладных штампах (рис. 6.2, *б*) и штамповки в закрепленных штампах (рис. 6.2, *в*). При этом второй и особенно третий методы по сравнению с первым позволяют в большей степени приблизить заготовку к готовой детали и снизить расход материала, но требуют дополнительных затрат на проектирование и изготовление штампов. При малом объеме выпуска эти затраты оказываются относительно большими и наименьшую себестоимость (рис. 6.3) имеют заготовки, полученные ковкой. По мере увеличения объема выпуска доля затрат на штампы в себестоимости заготовок снижается, и наиболее эффективным методом их получения становится сначала штамповка в подкладных, а затем – штамповка в более сложных и дорогих закрепленных штампах, которая дает наиболее значительную экономию материала.

Рис. 6.3. Зависимости себестоимости C исходных заготовок для зубчатого колеса от объема выпуска N для различных методов их изготовления: 1 – ковка; 2 – штамповка в подкладных штампах; 3 – штамповка в закрепленных штампах [15]

Необходимо отметить, что в машиностроении для получения нескольких близких по конструкции и технологии изготовления деталей применяют групповые (комплексные) заготовки. Это позволяет увеличить суммарный объем выпуска исходных заготовок и сделать экономически выгодным применение, например, штампованных заготовок вместо заготовок из проката. Пример групповой (комплексной) заготовки приведен на рис. 6.4.

Рис. 6.4. Пример групповой исходной заготовки:
1 – комплексная деталь; 2 – детали группы;
3 – групповая исходная заготовка [15]

6.6. Выбор технологических баз

6.6.1. Принципы выбора технологических баз

При выборе технологических баз следует руководствоваться двумя принципами: постоянства баз и совмещения баз.

Принцип постоянства баз. *В соответствии с принципом постоянства баз нужно стремиться к тому, чтобы на протяжении всего технологического процесса изготовления детали использовать одни и те же технологические базы, исключая, как правило, первые операции, которые служат для обработки самих технологических баз.*

Такое стремление продиктовано тем, что на погрешности размеров между поверхностями и на погрешности расположения поверхностей, обработанных от разных баз, переносятся погрешности размеров между самими базами и погрешности их расположения.

Рис. 6.5. Влияние погрешности расположения технологических баз на погрешности расположения обработанных поверхностей

Влияние погрешностей расположения технологических баз на погрешности расположения поверхностей, обработанных от этих баз, наглядно показано на рис. 6.5. При сверлении отверстия А (рис. 6.5, *а*) в ка-

честве установочной базы используется плоскость *I*, а направляющей – плоскость *II*. При сверлении отверстия Б (рис. 6.5, *б*), наоборот, установочной базой является плоскость *II*, а направляющей – плоскость *I*. Как видно из рис. 6.5, погрешность расположения технологических баз (отклонение от перпендикулярности плоскостей *I* и *II*) полностью переносится на погрешность расположения отверстий А и Б.

Рассмотрим еще один пример. У пластины, показанной на рис. 6.6, *а*, необходимо выдержать конструкторские размеры $К_2$ и $К_3$ (размер $К_1 = А_1 = 100 \pm 0{,}1$ мм был получен ранее). Растачивание отверстия диаметром 40 мм (первая операция) производится на токарном станке, а сверление двух отверстий диаметром 6 мм (вторая операция) – по кондуктору на вертикально-сверлильном.

Рис. 6.6. К влиянию смены технологических баз на погрешность конструкторского размера

Проанализируем два варианта обработки. В первом варианте обе операции (рис. 6.6, *б* и 6.6, *в*) выполняются при использовании одних и тех же технологических баз. Во втором варианте при выполнении первой операции (рис. 6.6, *б*) в качестве направляющей базы используется плоскость *I*, а при выполнении второй операции – плоскость *II* (рис. 6.6, *г*).

В обоих вариантах обработки конструкторский размер $К_2 = А_2$ (рис. 6.6, *б*) выдерживается непосредственно.

Конструкторский размер $К_3$ в первом варианте обработки оказывается замыкающим звеном в технологической размерной цепи, показанной на рис. 6.6, *д*. Допуск этого размера

$$ТК_3 = ТА_2 + ТА_4 = 0{,}2 + 0{,}2 = 0{,}4 \text{ мм}$$

соответствует требованиям чертежа пластины.

Во втором варианте обработки размер $К_3$ получается в виде замыкающего звена в более длинной размерной цепи (рис. 6.6, *е*). Одним из составляющих звеньев этой цепи является размер между направляющими базами $А_1 = 100 \pm 0{,}1$ мм, использованными при выполнении первой и второй операций. Допуск размера $К_3$ в этом варианте обработки

$$ТК_3 = ТА_1 + ТА_2 + ТА_3 = 0{,}2 + 0{,}2 + 0{,}2 = 0{,}6 \text{ мм}$$

не соответствует требованиям чертежа.

Таким образом, смена баз увеличивает погрешность (допуск) выдерживаемого размера ($К_3$) на величину погрешности (допуска) размера ($А_1$) между базами.

Необходимость в смене технологических баз возникает, когда заготовку приходится обрабатывать на различных технологических системах. Прибегать к смене технологических баз приходится при обработке заготовок, имеющих значительные остаточные напряжения. В этом случае сначала производится черновая обработка большинства поверхностей, которая из-за перераспределения остаточных напряжений сопровождается деформациями заготовки. Затем обычно следует отжиг или естественное старение, обеспечивающие снятие остаточных напряжений и стабилизацию размеров и формы заготовки. После этого выполняется окончательная обработка тех ее поверхностей, которые в дальнейшем служат технологическими базами.

Необходимо подчеркнуть, что наряду с преднамеренной сменой баз на протяжении технологического процесса изготовления детали может иметь место случайная смена баз. Например, это может быть при установке призматической заготовки в тисках (рис. 6.7). У заготовки обработке подвергается верхняя плоскость, которая должна быть параллельна нижней плоскости Б. Из-за неперпендикулярности направляющей базы

(плоскости А) установочной базе (плоскости Б), неперпендикулярности рабочей плоскости подвижной губки тисков ее направляющим и зазора между губкой и направляющими (рис. 6.7, *а*) при закреплении (приложении силы $P_з$) заготовка повернется в тисках и займет положение, показанное на рис. 6.7, *б*. Произойдет случайная смена баз: установочной базой станет плоскость А, а направляющей – плоскость Б. После обработки плоскость В окажется непараллельной плоскости Б (рис. 6.7, *б*).

Полностью принцип постоянства баз реализуется при обработке заготовок с одной установки, когда в качестве баз используются их необрабатываемые поверхности. При этом погрешности размеров между обработанными поверхностями и погрешности их расположения оказываются практически независимыми от погрешности установки. Это позволяет достичь наиболее высокой точности обработки.

Рис. 6.7. Смена баз у заготовки при закреплении в тисках

Отметим, что одним из побудительных мотивов создания станков типа «обрабатывающий центр» было стремление обеспечить обработку сложных заготовок при минимальном числе установок. Такие станки, на которых можно обрабатывать заготовки с разных сторон и разными методами, не только уменьшают влияние погрешностей установки на точность обработки заготовок, но и сокращают затраты времени на выполнение технологического процесса за счет уменьшения числа установок.

Выдержать принцип постоянства баз позволяет применение искусственно создаваемых технологических баз (центровые отверстия на заготовках валов, специально обрабатываемые с высокой точностью отверстия на заготовках корпусов, различного рода приливы, бобышки и т. п.).

Принцип совмещения баз. *В соответствии с принципом совмещения баз в качестве технологических баз необходимо стремиться брать те поверхности детали, от которых заданы конструкторские размеры.* Такими поверхностями могут быть конструкторские (основные и вспомогательные) базы детали, а также ее свободные поверхности, которые не контактируют ни с какими другими деталями в изделии.

Преимущества, обеспечиваемые реализацией принципа совмещения баз, покажем на примере.

При фрезеровании уступа у призматической заготовки на настроенном станке (рис. 6.8) должно быть обеспечено получение конструкторского размера К, заданного от верхней плоскости *I* заготовки. Рассмотрим два варианта базирования заготовки.

Рис. 6.8. Схемы фрезерования уступа у призматической заготовки

В первом варианте (рис. 6.8, *а*) технологической установочной базой, определяющей положение заготовки в вертикальном направлении, является нижняя плоскость *II*. При фрезеровании уступа выдерживается технологический размер A_2; технологический размер A_1 был получен на предыдущей операции. Таким образом конструкторский размер К оказывается замыкающим звеном в технологической размерной цепи A_1, A_2, К. Для обеспечения его точности необходимо, чтобы $TK \geq TA_1 + TA_2$, т. е. допуски технологических размеров должны быть значительно меньше допуска конструкторского размера. Если размер К ограничен жестким допуском, то выполнение размеров A_1 и A_2 (с еще более жесткими допусками) может оказаться затруднительным из-за необходимости частой поднастройки станка, смены инструмента и т. п. или даже технически неосуществимым.

Во втором варианте (рис. 6.8, *б*) за технологическую установочную базу взята плоскость *I*. При фрезеровании уступа выдерживается технологический размер A_3, совпадающий с конструкторским размером К. Другими словами, конструкторский размер К выдерживается непосредственно. Условие обеспечения его точности $TK \geq TA_3$.

Таким образом, совмещение технологических баз с поверхностями (осями) детали, от которых заданы конструкторские размеры, позволяет достичь их точности кратчайшим путем, обеспечив минимальные затраты на обработку.

Отметим, что допуск размера, связывающего поверхность, от которой задан конструкторский размер, с технологической базой (TA_1 для

рассмотренного примера), принято называть погрешностью от несовмещения баз. Ясно, что на настроенном станке выдержать конструкторский размер с погрешностью, меньшей погрешности от несовмещения баз, невозможно.

Следует иметь в виду, что на пути реализации принципа совмещения баз возникают некоторые затруднения. Поверхности, от которых заданы конструкторские размеры, могут иметь недостаточные габариты, что при использовании их в качестве технологических баз может привести к большим погрешностям установки заготовок. В ряде случаев возникает необходимость применения для установки заготовок сложных приспособлений. Например, для реализации схемы базирования заготовок, показанной на рис. 6.8, *б*, потребуется приспособление, в котором силы закрепления направлены снизу вверх.

Необходимо отметить, что если обработка заготовок (рис. 6.8, *а*) ведется методом пробных ходов, то размер К будет выдержан непосредственно.

В соответствии с принципом совмещения баз следует по возможности совмещать также технологические и измерительные базы, так как использование в качестве них разных поверхностей неизбежно увеличивает погрешности измерений параметров заготовки (детали).

6.6.2. Выбор технологических баз на первой операции

На первой операции (или нескольких первых операциях) технологического процесса изготовления детали, как уже отмечалось, производится обработка тех поверхностей, которые служат в дальнейшем технологическими базами. При выполнении первой операции в качестве технологических баз приходится использовать необработанные поверхности заготовки. Для обеспечения наиболее высокой точности установки эти поверхности должны иметь достаточные габариты, возможно более высокую точность формы и расположения относительно других поверхностей заготовки, а также наименьшую шероховатость. В качестве баз на первой операции не следует брать поверхности, на которых расположены прибыли и литники (в отливках), швы (на поковках), возникшие в местах разъема штампов и т. п.

Необходимо особо подчеркнуть, что из-за низкой точности и большой шероховатости необработанных поверхностей их применение в качестве технологических баз приводит к значительной погрешности установки заготовки. Поэтому использовать необработанные поверхности как технологические базы нужно, как правило, только один раз – на первой операции.

От выбора баз на первой операции зависит:

- точность положения необрабатываемых поверхностей заготовки относительно обработанных;
- распределение припусков на обработку между отдельными поверхностями заготовки.

Требования в отношении точности положения необрабатываемых поверхностей относительно обработанных, т. е. точности размеров между этими поверхностями и точности их расположения, диктуются функциональным назначением детали (условиями ее прочности, жесткости, динамической уравновешенности и др.).

Для достижения наиболее высокой точности положения необрабатываемых поверхностей заготовки относительно обработанных в качестве технологических баз на первой операции необходимо брать именно необрабатываемые поверхности.

Например (рис. 6.9), для обеспечения наибольшей точности положения полок *I* корпуса, которые не подвергаются обработке резанием, относительно плоскости его основания *II* именно поверхность полок следует взять за технологическую базу на первой (фрезерной) операции.

Рис. 6.9. Схема фрезерования основания корпуса

Выбор баз на первой операции определяет, насколько равномерными будут припуски на обработку поверхностей заготовки. Особенно важно получить равномерные припуски на обработку охватывающих поверхностей (отверстий, пазов и т. п.), которые обрабатываются инструментами пониженной жесткости. Действительно, чем больше, например, неравномерность припуска на обработку отверстия, тем большее количество рабочих ходов, переходов или даже операций потребуется для его обработки и тем ниже будет ее производительность и выше себестоимость. В некоторых случаях равномерность припуска на обработку нужна для того, чтобы добиться высокого качества поверхностного слоя детали.

Для обеспечения наиболее равномерного припуска на обработку отдельной поверхности заготовки именно эту поверхность необходимо использовать в качестве технологической базы на первой операции.

Для иллюстрации данного положения рассмотрим пример обработки станины токарного станка (рис. 6.10). Станины обычно отливают направляющими вниз, чтобы получить на них плотный и однородный слой ме-

талла. Для сохранения этого слоя и обеспечения высокой износостойкости направляющих с них нужно снять небольшой и равномерный припуск. С этой целью в качестве технологических баз на первой операции используют поверхности направляющих (рис. 6.10, *а*) и наибольший, неравномерный припуск удаляют с поверхности ножек. На следующей операции (рис. 6.10, *б*) технологическими базами являются поверхности ножек, что дает возможность снять с направляющих равномерный припуск. Ясно, что если за базы на первой операции взять поверхности ножек, то с направляющих будет снят неравномерный припуск. Это приведет при эксплуатации станка к неравномерному износу направляющих по длине.

Рис. 6.10. Схемы обработки станины токарного станка

Как следует из вышеизложенного, от выбора баз на первой операции зависят важнейшие технико-экономические показатели технологического процесса изготовления детали. В связи с этим вопросу выбора баз на первой операции всегда необходимо уделять должное внимание.

Следует подчеркнуть, что варианта базирования заготовки на первой операции, который бы обеспечивал наибольшую точность положения необрабатываемых поверхностей заготовки относительно обработанных и равномерное распределение припусков на обработку каждой поверхности, не существует. Один вариант базирования дает возможность получить более высокую точность размера между необрабатываемыми и обработанными поверхностями заготовки и точность их расположения, другой – обеспечивает более равномерное распределение припусков на обработку. Поэтому возникает необходимость рассмотреть несколько вариантов базирования заготовки на первой операции и выбрать из них наиболее приемлемый. Проще всего это можно сделать, используя аппарат размерного анализа технологических процессов изготовления деталей.

Методику выбора варианта базирования заготовки на первой операции рассмотрим на примере. Предположим, что при изготовлении корпусной детали, эскиз которой дан на рис. 6.11, *а*, необходимо выдержать конструкторские размеры $К_1$, $К_2$, $К_3$ и $К_4$, обеспечив при этом наименьшее колебание припуска на растачивание отверстия в вертикальном направлении. Исходная заготовка получается литьем в песчаные формы;

ее эскиз с интересующими нас размерами приведен на рис. 6.11, *б*. Поверхности *I* и *II* корпуса (рис. 6.11, *а*) являются необрабатываемыми.

Рассмотрим два варианта обработки заготовки. В обоих вариантах на первой операции (рис. 6.11, *в* и *г*) производится фрезерование плоскости основания. На второй операции – растачивании отверстия (рис. 6.11, *д*) – эта плоскость используется в качестве установочной базы. Отличие вариантов обработки состоит только в выборе баз при выполнении первой операции. В первом варианте положение заготовки в вертикальном направлении определяет установочная база (необрабатываемая плоскость *I* полок), во втором – двойная направляющая база (ось отверстия, которым заготовку устанавливают на кулачковую оправку).

Рис. 6.11. Эскизы детали (а, б), исходной заготовки (в) и операционные эскизы ее обработки (г, д)

Проанализируем, используя метод максимума-минимума, как будет влиять выбор баз на первой операции на точность конструкторских размеров и колебание припуска на растачивание отверстия. С этой целью для первого и второго вариантов обработки заготовки построим размерные схемы и графы технологических размерных цепей, как это показано на рис. 6.12 и 6.13.

По размерным схемам или графам (что значительно проще) найдем технологические размерные цепи, замыкающими звеньями которых являются интересующие нас конструкторские размеры и припуск.

В первом варианте обработки заготовки (см. рис. 6.12, *а* и *б*) конструкторские размеры $К_2$, $К_3$ и $К_4$ совпадают соответственно с технологическими размерами $А_1$, $А_3$ и $А_2$, т. е. выдерживаются непосредственно.

Конструкторский размер $К_1$ и припуск на растачивание отверстия *I* оказываются замыкающими звеньями в технологических размерных цепях, показанных соответственно на рис. 6.12, *в* и *г*. Три составляющих звена в этих цепях являются размерами исходной заготовки и, следовательно, имеют относительно большие допуски. Допуск размера $К_1$ составит

$$ТК_1 = ТА_{01} + ТА_{02} + ТА_{04} + ТА_1 + ТА_2,$$

а допуск (колебание) припуска Z –

$$TZ = ТА_{02} + 0{,}5 \cdot ТА_{03} + ТА_{04} + ТА_1 + ТА_2 + 0{,}5 \cdot ТА_3.$$

Рис. 6.12. Размерная схема технологического процесса (1 вариант), граф и схемы технологических размерных цепей

Во втором варианте обработки заготовки (см. рис. 6.13, *а* и *б*) конструкторские размеры $К_3$ и $К_4$ выдерживаются непосредственно, совпадая соответственно с технологическими размерами $А_3$ и $А_2$. Конструкторский размер $К_1$ и припуск Z оказываются замыкающими звеньями в значительно более коротких технологических размерных цепях, приведенных соответственно на рис. 6.13, *в* и *г*. Лишь одно из составляющих звеньев этих цепей является размером исходной заготовки. Допуски размера $К_1$ и припуска Z составят

$$ТК_1 = ТА_{01} + ТА_1' + ТА_2;$$

$$TZ = ТА_1' + ТА_2 + 0{,}5 \cdot ТА_{03} + 0{,}5 \cdot ТА_3.$$

Конструкторский размер $К_2$ – замыкающее звено в технологической размерной цепи, изображенной на рис. 6.13, *д*; его допуск

$$ТК_2 = ТА_{02} + ТА_{04} + ТА_1'.$$

Рис. 6.13. Размерная схема технологического процесса (2 вариант), граф и схемы технологических размерных цепей

Если, например, принять, что допуски всех размеров исходной заготовки (отливки) составляют 1,0 мм, допуски всех размеров, выдерживаемых при обработке резанием, равны 0,2 мм, то для первого варианта будем иметь $ТК_1 = 3{,}4$ мм, $TZ = 3{,}0$ мм, $ТК_2 = 0{,}2$ мм, а для второго – $ТК_1 =$ $= 1{,}4$ мм, $TZ = 1{,}0$ мм, $ТК_2 = 2{,}2$ мм.

Таким образом, второй вариант обработки по сравнению с первым позволяет обеспечить значительно бóльшую точность размера $К_1$, гораз-

до меньшее колебание припуска Z на растачивание отверстия, но меньшую точность размера $К_2$. Если учесть, что с позиции функционального назначения детали к точности размера $К_2$ обычно высокие требования не предъявляются, то второй вариант обработки (вариант базирования заготовки на первой операции) следует считать предпочтительным.

6.6.3. Выбор технологических баз на большинстве операций

При выборе технологических баз на большинстве операций технологического процесса изготовления детали необходимо руководствоваться рассмотренными выше принципами постоянства и совмещения баз. Однако, как уже отмечалось, одновременное соблюдение этих принципов часто оказывается невозможным.

Наиболее полно принципы постоянства и совмещения баз могут быть реализованы, когда все конструкторские размеры детали заданы от одних и тех же ее поверхностей. Чаще всего в качестве таких поверхностей выступают основные базы детали. Именно эти поверхности следует обработать на первой операции (нескольких первых операциях) и затем использовать в качестве технологических баз на большинстве операций технологического процесса.

Необходимо не только стремиться соблюдать принципы постоянства и совмещения баз, но и сократить число установок заготовки на протяжении технологического процесса, помня, что каждая установка даже при неизменных технологических базах сопровождается ее погрешностями и снижением точности обработки заготовки.

При смене баз в качестве новых следует выбирать наиболее качественно обработанные поверхности, имеющие наибольшую точность положения по отношению к ранее использованным базам. При этом, как уже отмечалось, в первую очередь внимание следует уделять обеспечению точности расположения поверхностей, а затем уже точности размеров детали.

6.7. Выбор маршрутов обработки отдельных поверхностей детали

На данном этапе разработки технологического процесса намечают маршруты обработки отдельных поверхностей детали, т. е. определяют перечень последовательно выполняемых переходов или операций для достижения заданной точности этих поверхностей и качества их поверхностных слоев.

Таблица 6.3

Примерные маршруты обработки наружных цилиндрических поверхностей [10]

Последовательность переходов (операций) при обработке до квалитета						Шероховатость, мкм
IT 14- *IT* 12	*IT* 11- *IT* 10	*IT* 9- *IT* 7	*IT* 6	*IT* 5	*IT* 4- *IT* 3	
1, 2, 3 **О** 4 **О**. ТО 1 **Ш** 4 ТО, **Ш**						$Rz = 80 \div 20$
←	1, 2, 3 Оп, **Оч** 1, 2 О, **Ш** 4 Оп, **Оч**, ТО 4 Оп, ТО, **Ш**					Rz 20– Ra 2,5
←	←	1, 2, 3 Оп, Оч, **От** 1, 2 О, **Ш** 1 Шп, **Шч** 4 О, ТО, **Ш** 4 Шп, ТО, **Ш**				$Ra = 1{,}25 \div 0{,}63$
←	←	3 Оп, **Оч**, ПО 3 **О**, Поп, ПОч 3 О, Оч, **От**	1, 2, 3 Оп, Оч, **От**, ПО 1 О, Шп, Шт, ПО 1 О, **Ш**, С 4 О, Шп, ТО, **Шт** 4 О, Шп, ТО, **Шт**, С 4 О, ТО, **Шч**, С	4 Оп, Оч, ТО, **Шч**, С 4 О, Шп, ТО, Шч, **Шт**, С 4 О, Шп, ТО, **Шч**, Д 3 О, Оч, **От**		$Ra = 0{,}32 \div 0{,}16$
		3 Оп, **Оч**, ПОп, ПОч 3 Оп, Оч, **От**, ПОч, Пот 4 Оп, ТО, Шп, **Шт**, ПО	←	1 Оп, Оч, Шп, **Шч**, Сп, Сч 4 Оп, Оч, ТО, **Шч**, Сч 4 Оп, Оч, ТО, **Шч**, Шт, Д 4 Оп, Оч, ТО, **Шч**, Дп, Дч 4 Ш, ТО, **Ш**, Сп, Сч		$Ra = 0{,}08 \div 0{,}04$
			←	←	4 Оп, Оч, ТО, Шч, **Шт**, Дп, Дч, Дт 4 Ш, ТО, Шп, **Шт**, Дп, Дч, Дт	$Rz = 0{,}1 \div 0{,}025$

Обозначения: О – обтачивание; Ш – шлифование; С – суперфиниширование; ПО – полирование; Д – доводка; ТО – термическая обработка; п – предварительное; ч – чистовое; т – тонкое; 1 – незакаленные стали; 2 – чугуны; 3 – цветные металлы и сплавы; 4 – закаленные стали.

Примечание. Полужирным шрифтом выделены операции, формирующие погрешности расположения поверхностей.

Таблица 6.4

Примерные маршруты обработки внутренних цилиндрических поверхностей [10]

Последовательность переходов (операций) при обработке до квалитета						Шерохо-ватость, мкм
IT 14- *IT* 12	*IT* 11- *IT* 10	*IT* 9- *IT* 7	*IT* 6	*IT* 5	*IT* 4- *IT* 3	
1, 2, 3 **С** 1, 2, 3 **З** 1, 2, 3 **РТ** 4 С, ТО 4 З, ТО 4 РТ, ТО						$Rz = 80 \div 20$
	1, 2, 3 С, З, Р 1, 2, 3 С, З, **РТ** 1, 2, 3 С, **РТ**, Р 4 С, З, ТО, Ш 4 С, **РТ**, ТО 4 Зп, Зч, ТО, **Ш**					Rz 20– Ra 2,5
		1, 2, 3 **РУ**, Р 1, 2, 3 С, **З**, Рп, Рч 1, 2, 3 С, РТп, **РТч** 1, 2, 3 С, З, **АР** 1, 2, 3 **С**, П 4 С, РТ, ТО, **Ш** 4 РТп, Рч, ТО, **Ш** 4 С, З, ТО, **Ш** 4 **РУ**, ТО, Х				$Ra = 1{,}25 \div 0{,}63$
			1, 2, 3 **РУ**, Рп, Рч 1, 2, 3 С, **З**, Рп, Рч 1, 2, 3 С, З, АРп, **АРч** 1, 2, 3 РТ, АРп, **АРч** 1, 2, 3 С, З, П 4 РТ, ТО, **Ш**, Х 4 С, З, ТО, **Ш**, Х 4 С, **П**, ТО, Х 4 **РУ**, З, ТО, Х	4 РТ, ТО, **Ш**, Х, Д 4 С, З, ТО, **Ш**, Х, Д 4 С, **П**, ТО, Хп, Хч 4 **РУ**, ТО, Х, Д 4 С, РТ, **АР**, ТО, Х, Д		$Ra = 0{,}32 \div 0{,}16$

Окончание табл. 6.4

Последовательность переходов (операций) при обработке до квалитета						Шероховатость, мкм
IT 14- *IT* 12	*IT* 11- *IT* 10	*IT* 9- *IT* 7	*IT* 6	*IT* 5	*IT* 4- *IT* 3	
				2 **РУ**, Х, Дп, Дч 2 С, **З**, Р, Х, Дп, Дч 4 **РУ**, Р, ТО, Х, Дп, Дч 4 С, **З**, Р, ТО, Дп, Дч 4 **С**, П, ТО, Х, Д 4 РТ, **АР**, ТО, Дп, Дч 4 С, РТ, **АР**, ТО, Х, Д	4 **РУ**, Р, ТО, Х, Дп, Дч 4 С, **З**, Р, ТО, Дп, Дч 4 **С**, П, ТО, Х, Дп, Дч 4 РТ, **АР**, ТО, Дп, Дч 4 С, РТ, **АР**, ТО, Х, Дп, Дч	$Ra = 0{,}08 \div 0{,}04$
					4 **РУ**, Р, ТО, Х, Дп, Дч, Дт 4 С, **З**, Р, ТО, Дп, Дч, Дт 4 **С**, П, ТО, Х, Дп, Дч, Дт 4 РТ, **АР**, ТО, Дп, Дч, Дт 4 С, РТ, **АР**, ТО, Х, Дч, Дт	$Rz = 0{,}1 \div 0{,}025$

Обозначения: С – сверление (рассверливание); З – зенкерование (координатное); РУ – ружейное сверление; Р – развертывание; РТ – растачивание; АР – алмазное растачивание; П – протягивание; Ш – шлифование; Х – хонингование; Д – доводка; ТО – термическая обработка; п – предварительное; ч – чистовое; т – тонкое; 1 – незакаленные стали; 2 – чугуны; 3 – цветные металлы и сплавы; 4 – закаленные стали.

Примечание. Полужирным шрифтом выделены операции, формирующие погрешности расположения поверхностей.

Таблица 6.5

Примерные маршруты обработки плоских поверхностей [10]

Последовательность переходов (операций) при обработке до квалитета						Шерохо-ватость, мкм
IT 14- *IT* 12	*IT* 11- *IT* 10	*IT* 9- *IT* 7	*IT* 6	*IT* 5	*IT* 4- *IT* 3	
1, 2, 3 **С** 1, 2, 3 **Ф** 1, 2, 3 **О** 4 **С**, ТО 4 **Ф**, ТО 4 **О**, ТО						$Rz = 80 \div 20$
←	1, 2, 4 ТО, **Шп** 1, 2, 3 Фп, **Фч** 1, 2 Ф, **Шп** 4 Ф, ТО, **Шп** 4 С, ТО, **Шп** 4 О, ТО, **Шп**					Rz 20– Ra 2,5
←	←	1, 2, 3 С, **П** 1, 2, 3 Ф, **П** 1, 2, Ф, **Шч** 4 Ф, ТО, **Шч** 4 О, ТО, **Шч** 4 С, ТО, **Шч**	1, 2 Фп, Фч, **Шч** 3 Фп, **Фч**, ПО 4 Фп, Фч, ТО, **Шч** 4 Оп, Оч, ТО, **Шч**			$Ra = 1{,}25 \div 0{,}63$
←	←	3 Фп, **Фч**, ПОч 3 Оп, **Оч**, ПОч	1, 2, 3 С, **Фт**, ШБ 1, 2, 3 Фп, **Фт**, ШБ 1, 2 Фп, Фч, **Шч**, ПО 4 Фп, Фч, ТО, **Шч**, Д 4 С, Фт, ТО, **Шч**, Д 4 Ф, ТО, Шп, **Шч**, Д 4 О, Шп, ТО, **Шч**, Д	4 С, ТО, Шч, **Шт**, Д 4 Ф, ТО, Шч, **Шт**, Д 4 Ф, Шп, ТО, Шч, **Шт**, Д 4 О, Шп, ТО, Шч, **Шт**, Д		$Ra = 0{,}32 \div 0{,}16$

Окончание табл. 6.5

Последовательность переходов (операций) при обработке до квалитета						Шероховатость, мкм
IT 14- *IT* 12	*IT* 11- *IT* 10	*IT* 9- *IT* 7	*IT* 6	*IT* 5	*IT* 4- *IT* 3	
		3 Фп, **Фч**, ПОч, Пот 3 Оп, **Оч**, ПОч, Пот		1, 2 Ф, Шп, Шч, **Шт**, ПО 4 С, ТО, Шп, Шч, **Шт** 4 Ф, ТО, Шп, Шч, **Шт** 4 Ф, ТО, Шп, Шч, **Шт**, Д 4 О, ТО, Шп, Шч, **Шт**, Д	4 С, ТО, Шп, Шч **Шт**, Дп, Дч 4 Ф, ТО, Шп, Шч **Шт**, Дп, Дч 4 О, ТО, Шп, Шч **Шт**, Дп, Дч 4 Ф, ТО, Шп, **Шч**, Дп, Дч	$Ra = 0{,}08 \div 0{,}04$
					4 С, ТО, Шп, Шч **Шт**, Дп, Дч, Дт 4 Ф, ТО, Шп, Шч **Шт**, Дп, Дч, Дт 4 О, ТО, Шп, **Шч**, Дп, Дч, Дт	$Rz = 0{,}1 \div 0{,}025$

Обозначения: С – строгание; Ф – фрезерование; П – протягивание; О – обтачивание торцов; Ш – шлифование; ШБ – шабрение; ПО – полирование; Д – доводка; ТО – термическая обработка; п – предварительное; ч – чистовое; т – тонкое; 1 – незакаленные стали; 2 – чугуны; 3 – цветные металлы и сплавы; 4 – закаленные стали.

Примечание. Полужирным шрифтом выделены операции, формирующие погрешности расположения поверхностей.

Для решения рассматриваемой задачи могут быть использованы таблицы рекомендуемых маршрутов (см. табл. 6.3–6.5). В них материалы деталей разделены на четыре группы: незакаленные стали, чугуны, цветные металлы и сплавы и закаленные стали. В каждой клетке таблиц дан набор разных маршрутов, обеспечивающих определенный квалитет точности и шероховатость поверхности. Так, например, для получения отверстия $\varnothing 20H7$ в стальной незакаленной детали могут быть использованы следующие маршруты (табл. 6.4, третья колонка):

- сверление (ружейным сверлом), растачивание;
- сверление (спиральным сверлом), зенкерование, развертывание предварительное, развертывание чистовое;
- сверление (спиральным сверлом), растачивание предварительное, растачивание чистовое;
- сверление (спиральным сверлом), зенкерование, алмазное растачивание;
- сверление (спиральным сверлом), протягивание.

Стрелки в табл. 6.3–6.5 указывают, что данный набор маршрутов может быть смещен в колонки более грубых квалитетов. Например, если при обработке наружных цилиндрических поверхностей (табл. 6.3) с точностью $IT\,14$–$IT\,12$ (первая колонка) требуется получить относительно малую шероховатость ($Ra = 2{,}5$ мкм), то можно использовать набор маршрутов из второй колонки, которые позволяют обеспечить это требование.

Как видно из табл. 6.3–6.5, число возможных маршрутов обработки отдельных поверхностей детали может быть достаточно велико. Его можно сократить с учетом ряда соображений. К ним можно отнести возможность обработки данной поверхности на одном станке, необходимость обработки ряда поверхностей за один установ для достижения требуемой точности их расположения, ограничение возможности применения отдельных методов обработки из-за низкой жесткости детали.

Представив себе, каким образом может быть обработана каждая из поверхностей детали, технолог приступает к разработке маршрута ее изготовления.

6.8. Разработка маршрутного технологического процесса изготовления детали. Выбор средств технологического оснащения и формирование операций

На основе выбранных маршрутов обработки отдельных поверхностей, а также ранее установленных типа производства, метода получения исходной заготовки, технологических баз разрабатывают маршрутный технологический процесс изготовления детали.

При установлении последовательности обработки заготовки руководствуются следующими положениями. Сначала обрабатывают поверхности, принятые в качестве технологических баз на большинстве операций технологического процесса. Затем обрабатывают поверхности, на которых могут обнаружиться скрытые дефекты исходной заготовки (раковины, поры, трещины и т. п.). При наличии таких дефектов дальнейшую обработку заготовки не производят; ее либо окончательно бракуют, либо принимают меры для исправления брака. Далее производят обработку остальных поверхностей в последовательности, обратной их точности: чем точнее должна быть поверхность, тем позже ее обрабатывают. В конец технологического процесса выносят обработку легкоповреждаемых поверхностей, например, наружных резьб.

Обработку заготовок точных деталей ответственного назначения часто делят на стадии: черновую, чистовую и отделочную, которые выполняют на разных станках. При черновой обработке удаляют основную массу металла в виде припусков и напусков; при этом формируются относительно большие погрешности заготовки из-за перераспределения остаточных напряжений, упругих деформаций технологической системы от сил резания и температурных деформаций этой системы. При чистовой обработке указанные погрешности уменьшаются. При отделочной обработке достигается требуемая точность детали и качество ее поверхностных слоев.

Нужно подчеркнуть, что деление технологического процесса на указанные стадии диктуется не только необходимостью обеспечения требуемой точности детали, но и необходимостью использования высокоточных станков только для отделочной обработки.

В то же время такое деление технологического процесса далеко не всегда является обязательным. При высокой точности исходной заготовки, ее достаточной жесткости и отсутствии в ней существенных остаточных напряжений черновая и чистовая обработки могут быть успешно выполнены на одной операции.

При изготовлении высокоточных (прецизионных) деталей, особенно сложной формы и малой жесткости, операции обработки резанием чередуют с операциями стабилизирующей термической обработки (в большинстве случаев отжига). Это снижает остаточные напряжения, стабилизирует структуру металла и позволяет достичь требуемой точности детали.

Если деталь подвергается закалке, то технологический процесс делят на две части: выполняемую до и после нее. До закалки обработку обычно выполняют лезвийными инструментами, после нее – преимущественно абразивными.

Разработка технологического процесса неразрывно связана с выбором средств технологического оснащения (станков, приспособлений, инструментов).

Выбор станков прежде всего диктуется необходимостью придания поверхностям детали соответствующей конфигурации и обеспечения требований по точности их размеров, формы и расположения, а также шероховатости. Если это возможно на различных станках, то выбор производят, учитывая следующие факторы:

- соответствие размеров станка габаритным размерам заготовки;
- соответствие производительности станка объему выпуска деталей (типу производства);
- возможность наиболее полного использования станка по времени и мощности;
- возможность достижения наименьшей трудоемкости и себестоимости обработки заготовки.

В единичном производстве обычно используют универсальные станки с ручным управлением, например, токарно-винторезные, токарно-карусельные, радиально- и вертикально-сверлильные, вертикально- и горизонтально-фрезерные, строгальные, долбежные, круглошлифовальные и т. п. В мелко- и среднесерийном производствах применяют менее универсальные, но более производительные станки с автоматизацией управления: токарно-револьверные полуавтоматы, сверлильные одно- и многошпиндельные полуавтоматы, токарно-винторезные с ЧПУ, вертикально-сверлильные с ЧПУ и т. п. Для станков, используемых в условиях крупносерийного и массового производств, характерна узкая специализация, высокая производительность и высокая степень автоматизации. К таким станкам относятся многошпиндельные токарные полуавтоматы и автоматы, агрегатные станки, специализированные шлифовальные автоматы и т. п. В условиях этих типов производств широко используют автоматические линии: гибкие из станков с ЧПУ в крупносерийном производстве; жесткие из агрегатных и специальных станков в массовом производстве.

Вместе с выбором станка нужно установить вид станочного приспособления и выбрать режущий и измерительный инструменты. Если необходимое для выполнения операции приспособление является принадлежностью станка (патрон, тисы, люнеты), то указывают только его наименование. При использовании универсально-сборного приспособления технолог делает соответствующее указание. Если для выполнения операции требуется специальное приспособление, то технолог обычно разрабатывает только его принципиальную схему; разработку конструкции про-

изводит конструктор по технологической оснастке. В единичном и мелкосерийном производствах в основном используют универсальные приспособления (тисы, универсальные делительные головки, поворотные столы и т. п.), а также универсально-сборные приспособления; специальные приспособления главным образом применяют в крупносерийном и массовом производствах.

Выбор режущих инструментов определяется моделью станка, материалом детали (заготовки), ее конфигурацией и размерами, необходимой точностью и качеством поверхностных слоев, а также типом производства. Обычно стараются ограничиться использованием стандартных и нормализованных режущих инструментов. В ряде случаев, особенно в крупносерийном и массовом производствах, могут потребоваться специальные режущие инструменты: фасонные резцы, фрезы, протяжки и др., которые необходимо спроектировать и изготовить.

Выбор измерительных инструментов диктуется размерами и конфигурацией детали, ее точностью, качеством поверхностных слоев и типом производства. Измерительный инструмент должен обеспечивать измерение линейных размеров от 1 до 500 мм с допустимой погрешностью, регламентируемой ГОСТ 8.051-81. Так, при допусках $IT\,14$ и $IT\,6$ эта погрешность не должна превышать соответственно 20 и 30 % от допуска. Если, например, в условиях единичного и мелкосерийного производств для контроля диаметров наружных цилиндрических поверхностей применяют штангенциркули, микрометры или рычажные скобы, то в крупносерийном и массовом производствах – калибры-скобы, обеспечивающие высокую производительность контроля. В настоящее время для комплексного контроля параметров точности деталей все более широкое применение находят координатно-измерительные машины.

Содержание операций обработки резанием устанавливают объединением тех переходов (содержащихся в выбранных маршрутах обработки отдельных поверхностей детали), которые могут быть выполнены на одном станке. При этом обработку поверхностей детали, имеющих высокую точность расположения, стремятся произвести за один установ. В отдельные операции выделяют обработку шлицев, зубьев (зубчатых колес), некруглых отверстий и т. п., требующих специальных станков.

При формировании операций анализируют возможность совмещения переходов, перекрытия основных переходов вспомогательными, целесообразность многоместной обработки. В массовом производстве содержание операций устанавливают таким образом, чтобы их длительность была равна или кратна такту выпуска деталей.

Рис. 6.14. Эскиз детали

Рис. 6.15. Эскизы операций обработки заготовки: а – первая операция; б – вторая операция

Последовательность переходов в операции зависит от простановки размеров на чертеже детали. Например, при простановке конструкторских размеров $К_i$ в соответствии с рис. 6.14 целесообразно обработку выполнить так, как показано на рис. 6.15 ($А_i$ – технологические размеры). На первой операции (токарной с ЧПУ) сначала нужно обработать торец A, а затем – торцы B и C; на второй операции (также токарной с ЧПУ) сперва необходимо обработать торец F, а потом – торцы E и G. Такая последовательность переходов в операциях позволяет выдержать все конструкторские размеры непосредственно и обеспечить их точность с наименьшими затратами.

6.9. Размерный анализ разрабатываемого технологического процесса

Такой анализ включает следующие основные этапы:

- определение допусков на технологические размеры;
- определение минимальных припусков на обработку;
- расчет технологических размеров.

6.9.1. Определение допусков на технологические размеры

Допуски размеров исходной заготовки находятся по соответствующим стандартам и справочным материалам.

Допуски размеров, получаемых на операциях механической обработки, определяются с использованием таблиц точности. Наиболее пол-

ные таблицы точности приведены в книге [10]. Выдержки из них даны в табл. 6.6, в которой в качестве примера представлены статистические данные по погрешностям размеров заготовок (ω_c), обрабатываемых на различных токарных станках. Причем погрешности даны для различных групп размеров. Например, применительно к обработке заготовок на токарно-револьверных станках размеры разделены на три группы:

- получаемые от технологических баз;
- получаемые от настроечной базы* с помощью резцов, установленных на разных позициях;
- получаемые между резцами, установленными в одной державке.

Таблица 6.6

Средние статистические погрешности механической обработки (ω_c)

Вид обработки	Оборудование и методы обработки	Способ обеспечения точности	Рабочий ход	Точность		
				диаметральных размеров *IT*	осевых размеров при их номинальных значениях, мм	
					до 80	80…260
Токарная обработка	Токарно-винторезные станки	По предварительно настроенному лимбу с использованием поворотного резцедержателя	I	12…13	0,30	0,40
			II	10	0,12	0,20
	Прецизионные токарные станки	То же	I	8…9	0,08	0,10
			II	6…7	0,04	0,054
	Токарные станки с ЧПУ	По программе	I	11	0,20	0,25
			II	10	0,12	0,17
	Малые карусельные станки	По предварительно настроенному лимбу	I	12…13	0,25	0,30
		По упорам	II	8…9	0,07	0,10
	Операционные токарные станки	По упорам	I	11	0,15	0,20
			II	8…9	0,06	0,08

* Термин «настроечная база» находит применение в литературе по технологии машиностроения для обозначения обрабатываемой при данном установе поверхности заготовки, которая связана технологическим размером с соответствующей технологической базой и от которой выдерживаются другие технологические размеры (на том же установе). Например (см. рис. 6.16), «настроечной базой» является торец 1 заготовки, который связан размером A_1 с технологической базой и от которого выдерживается размер A_2.

Окончание табл. 6.6

Вид обработки	Оборудование и методы обработки	Способ обеспечения точности	Рабочий ход	Точность		
				диаметральных размеров *IT*	осевых размеров при их номинальных значениях, мм	
					до 80	80…260
Токарная обработка	Токарно-револьверные станки	По упорам от технологических баз	I	12…13	0,25	0,30
			II	10	0,15	0,17
		От настроечной базы между позициями	I	12…13	0,30	0,35
			II	11	0,20	0,25
		Между резцами в многорезцовой державке	I	12…13	0,12	0,17
			II	10	0,08	0,10
	Вертикальные многошпиндельные токарные полуавтоматы	По копирам и упорам от технологических баз	I	12…13	0,20	0,25
			II	10	0,12	0,15
		Между резцами в одном блоке	I	11	0,17	0,20
			II	8…9	0,08	0,10
		Между резцами с разных суппортов и позиций	I	12…13	0,20	0,25
			II	10	0,15	0,20
	Автоматы фасонно-продольного точения	По копирам от настроечной базы	I	10	0,12	0,17
			II	7…8	0,08	0,10
		Между резцами с различных суппортов	I	10	0,10	0,12
			II	7…8	0,06	0,08

Действительно, для указанных групп размеров величины погрешностей будут разными.

Рис. 6.16. Схема подрезки торцов заготовки

На рис. 6.16 показана схема подрезки торцев заготовки резцами, установленными в одной державке. Возникающая на операции погрешность закрепления заготовки $\varepsilon_з$ непосредственно войдет в погрешность размера A_1, выдерживаемого от технологической базы, и почти не повлияет на погрешность размера A_2, выдерживаемого между резцами. Износ правого резца и его упругие отжатия непосредственно будут сказываться на погрешности размера A_1. Совместное влияние износа резцов и их упругих отжатий на погрешность размера A_2 будет существенно более слабым. Если, например, допустить, что износ обоих резцов будет одинаков, то он вообще не окажет влияния на погрешность размера A_2. Таким образом, в целом погрешность размера A_2 будет значительно меньше погрешности размера A_1.

Если подрезка торца *1* заготовки (см. рис. 6.16) будет осуществляться на одной позиции револьверной головки, а подрезка торца *2* – на другой ее позиции, то на погрешности размера A_2 скажется неточность фиксации револьверной головки. Поэтому погрешность размера A_2, который в данном случае следует отнести ко 2-й группе размеров, будет значительно больше, чем его погрешность при одновременной подрезке торцев *1* и *2*.

Подобные группы размеров выделены и при работе на других станках, что дает возможность наиболее обоснованно подойти к определению допусков на технологические размеры.

Необходимо подчеркнуть, что таблицы точности составлены для условий, когда погрешность базирования была равна нулю ($\varepsilon_б = 0$) и когда технологические базы имели минимальные пространственные отклонения ($\rho_б \cong 0$). Указанные условия могут не соблюдаться в проектируемом технологическом процессе. В этой связи рассмотрим более подробно процедуру определения допусков на технологические размеры, используя конкретные примеры.

Пример 1. На рис. 6.17 показана схема подрезки торца и растачивания отверстия заготовки, выполняемые на первой (токарной) операции технологического процесса. Исходная заготовка, поступающая на эту операцию, имеет значительные пространственные отклонения технологической базы $\rho_б$, от которой выдерживается размер A, а также обрабатываемого отверстия.

В этом случае получить размер A с погрешностью менее $\rho_б$ невозможно как на настроенных станках, так и методом пробных ходов. Поэтому величина $\rho_б$ должна быть включена в допуск на размер A:

$$TA_1 = \omega_{c_1} + \rho_б ,$$

где ω_{c_1} – статистическая погрешность размера А, которая берется из таблиц точности. Значение $\rho_б$ определяется по стандартам на исходные заготовки.

Рис. 6.17. Схема подрезки торца и растачивания отверстия заготовки на первой операции

Допуск на диаметр расточенного отверстия Д принимается равным статистической погрешности ω_{c_2}, так как сами таблицы точности получены для условий, когда обрабатываемые поверхности тоже имели существенные пространственные отклонения.

Рис. 6.18. Схема фрезерования паза в планке

Пример 2. На рис. 6.18 дана схема фрезерования паза в планке. Технологическими базами служат ее нижняя плоскость и два перпендикуляр-

ных ей отверстия. При такой схеме установки, как указывалось в разд. 4, возникает погрешность базирования $\varepsilon_б$ в направлении выдерживаемых на операции размеров, равная максимальному зазору в сопряжении цилиндрического пальца с левым отверстием.

При обработке на настроенном станке выдержать размер A_1 с погрешностью, меньшей погрешности базирования, невозможно. Поэтому $\varepsilon_б$ должна быть включена в допуск на размер A_1:

$$TA_1 = \omega_{c_1} + \varepsilon_б .$$

На точности размера A_2 погрешность базирования $\varepsilon_б$ не будет сказываться. Его допуск составит

$$TA_2 = \omega_{c_2} .$$

Пример 3. На рис. 6.19 представлена схема обтачивания наружной поверхности втулки, установленной с зазором на жесткой цилиндрической оправке. На операции возникает погрешность базирования втулки в радиальном направлении $\varepsilon_б$. Однако $\varepsilon_б$ не будет непосредственно сказываться на погрешности диаметра Д и его допуск может быть принят равным статистической погрешности, т. е. $ТД = \omega_{c_1}$.

Рис. 6.19. Схема обтачивания втулки, установленной с зазором на цилиндрической оправке

На основе вышеизложенного правила назначения допусков на технологические размеры с использованием таблиц точности можно кратко сформулировать в следующем виде:

• *допуски на диаметральные размеры, а также допуски на расстояния между поверхностями, обработанными с одной установки, могут быть приняты равными статистической погрешности;*

• *допуски на расстояние* (A_i) *между обработанной поверхностью и технологической базой в общем случае могут быть определены по формуле*

$$TA_i = \omega_{c_i} + \rho_б + \varepsilon_б .$$

При использовании последнего правила необходимо иметь в виду, что остальные составляющие погрешности установки – погрешность закрепления и погрешность приспособления – входят в ω_{c_i}, так как таблицы точности составлены для условий, когда эти погрешности имели место.

Следует отметить, что в ряде случаев значения допусков на технологические размеры могут быть приняты больше их значений, определенных с помощью таблиц точности. Расширение допусков на технологические размеры позволяет снизить затраты на выполнение операции (появляется возможность работы на повышенных режимах резания, снижаются затраты на настройку и поднастройку станка, снижается квалификация рабочих и т. д.). Однако необходимо иметь в виду, что с увеличением допусков растут средние значения припусков на обработку и, как следствие, увеличиваются размеры исходной заготовки и ее стоимость. Поэтому к использованию расширенных допусков на технологические размеры следует подходить с должной осторожностью, учитывая все затраты на изготовление детали.

6.9.2. Определение минимальных припусков на обработку

Припуски принято делить на общие и промежуточные. Общий припуск необходим для выполнения всех технологических переходов обработки данной поверхности, промежуточный – для выполнения отдельного перехода. Ниже под термином «припуск» будем понимать промежуточный припуск.

Принято различать минимальное, максимальное, среднее и номинальное значения припуска на обработку. Однако первичным, определяющим остальные категории припуска, является его минимальное значение.

Минимальный припуск должен быть таким, чтобы его удаление было достаточно для обеспечения требуемой точности и качества поверхностного слоя обработанной поверхности заготовки.

Минимальные припуски на обработку $z_{i_{\min}}$ определяются двумя методами: нормативным и расчетно-аналитическим.

При *нормативном методе* значения $z_{i_{\min}}$ находят непосредственно по таблицам, которые составлены путем обобщения и систематизации

производственных данных. Этот метод благодаря своей простоте нашел широкое распространение в машиностроении. Основной недостаток нормативного метода – неполный учет особенностей выполнения конкретной операции (перехода). Значения припусков, определенные нормативным методом, обычно оказываются завышенными.

При *расчетно-аналитическом методе,* предложенным проф. В.М. Кованом, $z_{i_{\min}}$ находят путем суммирования отдельных составляющих, что позволяет наиболее полно учесть конкретные условия обработки. При этом выделяют следующие факторы, определяющие значения минимального припуска.

1. Шероховатость поверхности Rz_{i-1}, полученная на предшествующем переходе (операции) обработки данной поверхности.

При выполнении первой операции должна быть удалена шероховатость поверхности исходной заготовки. При выполнении второй операции нужно снять шероховатость поверхности, полученную на первой операции и т. д.

2. Толщина дефектного поверхностного слоя h_{i-1}, возникшего на предшествующем переходе (операции) обработки данной поверхности.

Так, у стальных заготовок, полученных горячей обработкой давлением (прокатка, штамповка, ковка), поверхностный слой оказывается обезуглероженным. Обезуглероженный слой возникает и при нагреве стальных заготовок под закалку. Очевидно, что этот слой должен быть удален при последующей механической обработке. На отливках из серого чугуна формируется так называемая перлитная корка, имеющая высокую твердость и следы формовочного песка. Удовлетворительная обработка таких заготовок резанием лезвийными инструментами возможна только в том случае, если вершина их режущей части будет расположена за пределами перлитной корки. При обработке заготовок резанием, особенно при сравнительно грубых режимах, создается сильно деформированный поверхностный слой с микроскопическими трещинами, который также подлежит удалению при последующей чистовой обработке.

3. Погрешность формы обрабатываемой поверхности, полученная на предшествующем переходе (операции) ее обработки $\rho_{\text{ф}_{i\text{-}1}}$, если эта погрешность не входит в допуск на соответствующий размер.

Например, если заготовка вала имеет изогнутость (рис. 6.20, *а*), то при измерении диаметра в любом сечении штангенциркулем, микрометром и т. п. она обнаружена не будет. Таким образом, указанная погрешность формы $\rho_{\text{ф}_{i\text{-}1}}$ не войдет в допуск на диаметр заготовки и поэтому должна быть компенсирована частью минимального припуска на обра-

ботку. Как следует из рис. 6.20, *а*, для получения при обтачивании заготовки диаметром $Д_i$ ее диаметр перед этим $Д_{i-1}$, по крайней мере, должен составлять

$$Д_{i-1} = Д_i + 2\rho_{ф_{i-1}}.$$

Рис. 6.20. Схемы обработки заготовок, иллюстрирующие влияние погрешности формы обрабатываемой поверхности на величину минимального припуска

Другими словами, для компенсации рассматриваемой погрешности формы обрабатываемой поверхности в величину минимального припуска следует включить составляющую $2\rho_{ф_{i-1}}$.

На рис. 6.20, *б* показана схема подрезки торца заготовки на токарном станке. Контроль размера A_{i-1} осуществляется предельными калибрами-

скобами. Очевидно, что при таком способе контроля отклонение от плоскостности $\rho_{ф_{i-1}}$ не войдет в допуск на размер A_{i-1} и должно быть компенсировано частью минимального припуска на обработку торца заготовки, которая составит $\rho_{ф_{i-1}}$.

4. Погрешность расположения обрабатываемой поверхности относительно технологических баз $\rho_{р_{i-1}}$*, возникшая на предшествующем переходе (операции) ее обработки.*

На рис. 6.21, *а* дана схема обтачивания вала, установленного в центрах. При сверлении центровых отверстий неизбежно возникает смещение их оси I–I относительно оси II–II вала $\rho_{р_{i-1}}$. Как видно из рис. 6.21, *а*, для получения при обтачивании вала диаметром $Д_i$ его диаметр $Д_{i-1}$ перед этим переходом должен быть

$$Д_{i-1} = Д_i + 2\rho_{р_{i-1}},$$

т. е. погрешность расположения обрабатываемой поверхности относительно технологической базы должна компенсироваться частью минимального припуска на обтачивание, которая составляет $2\rho_{р_{i-1}}$.

На рис. 6.21, *б* приведена схема растачивания отверстия во втулке, установленной в трехкулачковом патроне. Ось отверстия (до растачивания) I–I смещена относительно оси наружной поверхности втулки II–II на величину $\rho_{р_{i-1}}$. Очевидно, что для получения при растачивании отверстия диаметром $Д_i$ его диаметр $Д_{i-1}$ перед растачиванием должен, по крайней мере, составлять

$$Д_{i-1} = Д_i - 2\rho_{р_{i-1}}.$$

Таким образом, погрешность расположения обрабатываемого отверстия относительно наружной поверхности втулки (технологической базы) должна компенсироваться составляющей минимального припуска на обработку, равной $2\rho_{р_{i-1}}$.

На рис. 6.21, *в* представлена схема подрезки торца заготовки, который неперпендикулярен ее оси, используемой в качестве технологической базы. Измерение размера A_{i-1} заготовки осуществляется штангенциркулем. Поэтому погрешность расположения торца относительно оси заготовки $\rho_{р_{i-1}}$ не войдет в допуск на размер A_{i-1} и должна быть включена в минимальный припуск на подрезку этого торца.

Рис. 6.21. Схемы обработки заготовок, иллюстрирующие влияние погрешности расположения обрабатываемой поверхности относительно технологических баз на величину минимального припуска

5. Погрешность установки заготовки на выполняемом переходе (операции) $\varepsilon_{у_i}$.

На рис. 6.22, *а* показана схема обтачивания заготовки, установленной в трехкулачковом патроне. На операции возникает погрешность установки заготовки в радиальном направлении $\varepsilon_{у_i}$, равная погрешности закрепления $\varepsilon_{з_i}$. Как следует из схемы, для получения при обтачивании заготовки диаметром $Д_i$ ее диаметр перед этим $Д_{i-1}$ должен составлять

$$Д_{i-1} = Д_i + 2\varepsilon_{з_i}.$$

Таким образом, погрешность закрепления заготовки должна компенсироваться составляющей минимального припуска на обтачивание, равной $2\varepsilon_{з_i}$.

Рис. 6.22. Схемы обработки заготовок, иллюстрирующие влияние погрешностей их установки на величину минимального припуска

На рис. 6.22, *б* дана схема обтачивания втулки, установленной на жесткой цилиндрической оправке. На операции имеет место погрешность установки втулки в радиальном направлении $\varepsilon_{у_i}$, равная погрешности базирования $\varepsilon_{б_i}$. Из рис. 6.22, *б* видно, что для получения при обтачивании наружной поверхности втулки диаметром $Д_i$ диаметр этой поверхности до обтачивания $Д_{i-1}$, по крайней мере, должен быть

$$Д_{i-1} = Д_i + 2\varepsilon_{б_i},$$

т. е. погрешность базирования должна быть компенсирована составляющей $2\varepsilon_{б_i}$ минимального припуска на обтачивание.

При расчете минимального припуска на обработку плоскости погрешность установки не следует включать в его величину, так как эта погрешность входит в допуск на соответствующий технологический размер.

Погрешности $\rho_{ф_{i-1}}$ и $\rho_{р_{i-1}}$ являются векторными величинами. Их сумму ρ_{i-1} принято называть пространственным отклонением обрабатываемой поверхности.

Для поверхностей вращения направление векторов $\rho_{ф_{i-1}}$ и $\rho_{р_{i-1}}$ неизвестно. Наиболее вероятным является расположение этих векторов под прямым углом друг к другу, поэтому их суммируют по правилу квадратного корня, т. е.

$$\rho_{i-1} = \sqrt{\rho^2_{ф_{i-1}} + \rho^2_{р_{i-1}}}.$$

Для плоскостей эти векторы коллинеарны. Поэтому

$$\rho_{i-1} = \rho_{ф_{i-1}} + \rho_{р_{i-1}}.$$

Погрешность установки на выполняемом переходе $\varepsilon_{у_i}$ (для поверхностей вращения) обычно рассчитывается по формуле

$$\varepsilon_{у_i} = \sqrt{\varepsilon^2_{б_i} + \varepsilon^2_{з_i}},$$

где $\varepsilon_{б_i}$, $\varepsilon_{з_i}$ – погрешности базирования и закрепления на этом переходе. Причем следует иметь в виду, что в погрешность закрепления, как правило, входит и погрешность приспособления, которую трудно выделить как самостоятельную величину.

Пространственные отклонения обрабатываемой поверхности ρ_{i-1} и погрешности установки $\varepsilon_{у_i}$ также являются векторными величинами, и их также суммируют по правилу квадратного корня.

На основе вышеизложенного формулы для определения минимального припуска на обработку могут быть записаны в следующем виде:

- припуск на диаметр при обработке поверхностей вращения:

$$z_{i\min} = 2\left(Rz_{i-1} + h_{i-1} + \sqrt{\rho^2_{i-1} + \varepsilon^2_{у_i}}\right);$$

- припуск на обработку плоскости:

$$z_{i\min} = Rz_{i-1} + h_{i-1} + \rho_{i-1}.$$

В частных случаях эти формулы упрощаются. Так, при обтачивании цилиндрической поверхности заготовки, установленной в центрах, погрешность установки может быть принята равной нулю. Припуск на диаметр в этом случае определится по формуле

$$z_{i\min} = 2(Rz_{i-1} + h_{i-1} + \rho_{i-1}).$$

При развертывании отверстий плавающей разверткой последняя самоустанавливается по отверстию. Вследствие этого пространственное отклонение обрабатываемого отверстия ρ_{i-1} и погрешность установки заготовки ε_{y_i} не следует включать в состав минимального припуска. Его значение (припуск на диаметр) составит

$$z_{i\min} = 2(Rz_{i-1} + h_{i-1}).$$

Припуск на полирование плоскости, которое выполняют эластичным абразивным инструментом и используют только для обеспечения малой шероховатости, будет равен

$$z_{i\min} = Rz_{i-1}.$$

Почти все составляющие минимального припуска на обработку находят с помощью нормативно-справочных материалов; погрешность базирования определяется расчетом.

6.9.3. Расчет технологических размеров

Исходными данными для расчета технологических размеров являются: чертеж детали, вид исходной заготовки, технологический процесс изготовления детали, значения допусков на технологические размеры и минимальных припусков на обработку.

Расчет в общем случае производится из условий обеспечения:

- минимальных припусков на обработку;
- конструкторских размеров, непосредственно не выдерживаемых при изготовлении детали.

Расчет технологических размеров может выполняться методом максимума-минимума и вероятностным методом. Метод максимума-минимума рекомендуется использовать для технологических размерных цепей с числом составляющих звеньев (технологических размеров) $n + p \le 3$, вероятностный метод – при $n + p \ge 4$.

6.9.3.1. Задачи расчета технологических размеров

Рассмотрим решение задач, возникающих при расчете технологических размеров.

Задача расчета технологических размеров из условия обеспечения минимального припуска на обработку. На рис. 6.23 показана простейшая технологическая размерная цепь. Составляющими звеньями в этой цепи являются размер заготовки до обработки A_2 и ее размер после обработки A_1 (выполняемый размер), замыкающим звеном – припуск на обработку Z_1. Причем выполняемый размер A_1 совпадает с конструктор-

ским размером $К_1$ или найден из ранее рассмотренной технологической размерной цепи.

Рис. 6.23. Простейшая технологическая размерная цепь с замыкающим звеном – припуском

Таким образом, в рассматриваемой технологической размерной цепи известно номинальное значение и предельные отклонения одного составляющего звена ($А_1$), известен допуск второго составляющего звена ($А_2$) и известно минимальное значение замыкающего звена – припуска Z_1. Требуется определить номинальное значение и предельные отклонения составляющего звена $А_2$. Такая задача не относится ни к прямой, ни к обратной задаче теории размерных цепей и может быть названа смешанной.

Решение этой задачи обычно выполняется методом максимума-минимума с использованием способа средних значений. Суть решения состоит в следующем.

1. Определяется среднее значение составляющего звена $А_1$ ($А_1 = К_1$)

$$А_1^с = А_1 + \Delta_0 А_1 = А_1 + \frac{\Delta_в А_1 + \Delta_н А_1}{2}.$$

Это звено представляется в виде $А_1^с \pm \frac{ТА_1}{2}$.

2. Находится среднее значение припуска Z_1:

$$Z_1^с = \frac{Z_{1\min} + Z_{1\max}}{2}.$$

Учитывая, что

$$Z_{1\max} = Z_{1\min} + ТА_1 + ТА_2,$$

получим

$$Z_1^с = Z_{1\min} + \frac{ТА_1 + ТА_2}{2}.$$

3. Подсчитывается среднее значение звена $А_2$, которое находится из уравнения

$$Z_1^с = А_2^с - А_1^с,$$

откуда

$$А_2^с = А_1^с + Z_1^с.$$

Звено A_2 записывается в виде $A_2^c \pm \frac{TA_2}{2}$.

Рассмотрим решение еще одной разновидности рассмотренной задачи.

На рис. 6.24 изображена технологическая размерная цепь, замыкающим звеном которой является припуск Z_4, а составляющими звеньями – технологические размеры $A_1 - A_4$. Размеры A_3 и A_4 совпадают с конструкторскими размерами K_3 и K_4, размер A_1 найден из ранее рассмотренной технологической размерной цепи. Известно минимальное значение припуска Z_4 и предельные отклонения размера A_2. Нужно определить его номинальное значение, используя метод максимума-минимума.

Рис. 6.24. Технологическая размерная цепь с замыкающим звеном – припуском

Задача решается следующим образом.

Находится допуск размера A_2

$$TA_2 = \Delta_в A_2 - \Delta_н A_2 .$$

Определяется среднее значение припуска Z_4:

$$Z_4^c = Z_{4\min} + \frac{\sum_{i=1}^{n+p} TA_i}{2},$$

где $\sum_{i=1}^{n+p} TA_i$ – сумма допусков составляющих звеньев (технологических размеров) размерной цепи.

Из уравнения

$$Z_4^c = A_3^c + A_4^c - A_1^c - A_2^c$$

находится среднее значение размера A_2:

$$A_2^c = A_3^c + A_4^c - A_1^c - Z_4^c .$$

Номинальное значение размера A_2 составит:

$$A_2 = A_2^c - \frac{\Delta_в A_2 + \Delta_н A_2}{2} . \qquad (6.1)$$

Задача расчета технологических размеров из условия обеспечения конструкторских размеров, непосредственно не выдерживаемых при изготовлении детали. На рис. 6.25 дана технологическая размерная цепь, замыкающим звеном которой является конструкторский размер К. В этой цепи известны номинальные значения и предельные отклонения составляющих звеньев (технологических размеров) A_1, A_3 и A_4: размер A_4 совпадает с конструкторским размером, размеры A_1 и A_3 найдены из ранее рассмотренных технологических размерных цепей. Известен допуск размера A_2. Требуется найти номинальное значение и предельные отклонения этого технологического размера. Такая задача, которая также относится к смешанной, имеет следующее решение.

Рис. 6.25. Технологическая размерная цепь с замыкающим звеном – конструкторским размером

Проверяется возможность обеспечения спроектированным технологическим процессом требуемой точности конструкторского размера. Это делается в самом начале расчета технологических размеров.

При расчете методом максимума-минимума условие обеспечения точности конструкторского размера записывается в виде

$$\text{ТК} \geq \sum_{i=1}^{n+p} \text{ТА}_i. \qquad (6.2)$$

При расчете вероятностным методом (в предположении о нормальном распределении технологических размеров и $\text{ТА}_i = 6\sigma$) это условие принимает вид

$$\text{ТК} \geq \sqrt{\sum_{i=1}^{n+p} (\text{ТА}_i)^2}. \qquad (6.3)$$

Если неравенства (6.2) или (6.3) выполняются, то затем из уравнения (см. рис. 6.25)

$$\text{К}^{\text{с}} = \text{А}_1^{\text{с}} + \text{А}_4^{\text{с}} - \text{А}_2^{\text{с}} - \text{А}_3^{\text{с}}$$

находится среднее значение технологического размера A_2:

$$A_2^c = A_1^c + A_4^c - A_3^c - K^c.$$

Этот размер записывается в виде

$$A_2^c \pm \frac{TA_2}{2}.$$

Если указанные неравенства не выполняются, то необходимо либо несколько ужесточить допуски на технологические размеры (это потребует более частых поднастроек технологических систем), либо внести некоторые корректировки в технологический процесс изготовления детали, например, изменить технологические базы и (или) ввести в него дополнительные переходы.

При необходимости пересчета номинальных значений технологических размеров (с их средних значений) следует воспользоваться соотношением (6.1).

6.9.3.2. Методика расчета технологических размеров

Более подробно методику расчета технологических размеров рассмотрим на конкретном примере. В качестве такого примера возьмем технологический процесс изготовления втулки, эскиз которой приведен на рис. 6.26. Втулка получается из круглого проката обычной точности. Технологический процесс ее изготовления с условным обозначением технологических размеров представлен в табл. 6.7.

Рис. 6.26. Эскиз втулки (сталь ШХ15, $HRC_Э$ 60...63)

Таблица 6.7

Технологический процесс изготовления втулки

Операция (номер и наименование)	Переход, позиция (номер)	Приспособление	Эскиз	Содержание переходов
1. Токарно-револьверная	1	Трехкулачковый самоцентрирующий патрон	$\varnothing Д_0$	Центровать торец
	2		$\varnothing Д_{1.2}$	Сверлить отверстие
	3		$\varnothing Д_{1.3}$	Зенкеровать отверстие
1. Токарно-револьверная	4	Трехкулачковый самоцентрирующий патрон	$A_{1.1}$, $\varnothing Д_{1.4}$, $\varnothing Д_{1.5}$, $A_{1.2}$	Подрезать торец, обточить поверхности $\varnothing Д_{1.4}$ и $\varnothing Д_{1.5}$, выдержав размеры $A_{1.1}$ и $A_{1.2}$

Продолжение табл. 6.7

Операция (номер и наименование)	Переход, позиция (номер)	Приспособление	Эскиз	Содержание переходов
	5	Трехкулачковый самоцентрирующий патрон	$A_{1.6}$×45°; ∅$Д_{1.6}$; $A_{1.5}$×45°; $A_{1.4}$×45°; $A_{1.3}$	Обточить поверхность ∅$Д_{1.6}$, выдержав размер $A_{1.3}$, снять фаски $A_{1.4}$×45°, $A_{1.5}$×45° и $A_{1.6}$×45°
	6		∅$Д_{1.7}$; $A_{1.8}$; $A_{1.7}$; $A_{1.9}$	Проточить канавку ∅$Д_{1.7}$, выдержав размеры $A_{1.7}$ и $A_{1.8}$, отрезать заготовку, выдержав размер $A_{1.9}$
2. Токарно-револьверная	1	Трехкулачковый самоцентрирующий патрон	$A_{2.3}$×45°; $A_{2.2}$×45°; $A_{2.1}$	Подрезать торец, выдержав размер $A_{2.1}$, снять фаски $A_{2.2}$×45° и $A_{2.3}$×45°

Окончание табл. 6.7

Операция (номер и наименование)	Переход, позиция (номер)	Приспособление	Эскиз	Содержание переходов
3. Вертикально-сверлильная	1	Специальное (призма)	$A_{3.1}$, $\varnothing Д_{3.1}$	Сверлить отверстие $\varnothing Д_{3.1}$, выдержав размер $A_{3.1}$
4. Термическая	1			Закалить, отпустить, $HRC_Э$ 60…63
5. Внутришлифовальная	1	Цанговый патрон	$\varnothing Д_{4.1}$	Шлифовать отверстие
6. Круглошлифовальная	1	Коническая центровая оправка	0,03 Б; 0,03 А; Б; А; $\varnothing Д_{51}$; A_{51}	Шлифовать поверхность $\varnothing Д_{51}$ и торец, выдержав размер A_{51}

Продольные технологические размеры обозначены буквой А, диаметральные – буквой Д с соответствующими индексами. Напомним, что первая цифра индекса технологического размера соответствует номеру операции, при выполнении которой получается этот размер, а вторая – номеру перехода или порядковому номеру размера.

Технологический процесс (см. табл. 6.7) содержит термическую операцию, изменением размеров заготовки при осуществлении которой будем пренебрегать.

Сначала, как правило, рассчитываются диаметральные, а затем – продольные технологические размеры. Такой порядок расчета продиктован тем, что обработка поверхностей вращения может сопровождаться изменением продольных размеров заготовки.

Расчет диаметральных технологических размеров. В рассматриваемом примере этот расчет, как и в большинстве случаев, производится из условия обеспечения минимальных припусков на обработку. Расчет выполняется методом максимума-минимума с использованием способа средних значений.

Рис. 6.27. Размерные схемы технологических маршрутов обработки поверхностей вращения втулки: а – наружной $\varnothing 40_{-0,39}$; б – наружной $\varnothing 30_{-0,033}$; в – отверстия $\varnothing 14^{+0,027}$

Для расчета составляются размерные схемы технологических маршрутов обработки поверхностей вращения втулки, показанные на рис. 6.27. На схемах буквой К с буквенно-цифровым индексом обозначены диаметральные конструкторские размеры (буква Д в индексе означает, что конструкторский размер является диаметральным, цифра означает его порядковый номер). Буквой Z с буквенно-цифровым индексом по-

именованы припуски (буква Д в индексе означает, что это припуск на диаметр, цифра соответствует индексу диаметрального технологического размера, при получении которого удаляется этот припуск). В скобках указаны определенные ранее допуски или предельные отклонения диаметральных технологических размеров, а также значения минимальных припусков.

Расчет диаметра проката. Для определения диаметра проката ($Д_0$) необходимо рассмотреть технологическую размерную цепь $Д_0$, $Д_{1.5}$, $Z_{Д1.5}$ (рис. 6.27, *а*). В этой цепи известно: полностью составляющее звено $Д_{1.5}$ ($Д_{1.5} = К_{Д1}$), предельные отклонения составляющего звена $Д_0$ и минимальное значение замыкающего звена – припуска $Z_{Д1.5}$. Нужно найти номинальное значение звена $Д_0$. Решение такой задачи было разобрано выше. В соответствии с этим решением находим среднее значение звена $Д_{1.5}$:

$$Д_{1.5}^{с} = Д_{1.5} + \frac{\Delta_{в}Д_{1.5} + \Delta_{н}Д_{1.5}}{2} = 40 + \frac{0 - 0,39}{2} = 39,805 \text{ мм.}$$

Звено $Д_{1.5}$ записывается в виде $Д_{1.5}$= 39,805 ± 0,195 мм.

Определяется допуск звена $Д_0$:

$$ТД_0 = \Delta_{в}Д_0 - \Delta_{н}Д_0 = 0,4 - (-0,7) = 1,1 \text{ мм.}$$

Находится среднее значение припуска $Z_{Д1.5}$:

$$Z_{Д1.5}^{с} = Z_{Д1.5\min} + \frac{ТД_{1.5} + ТД_0}{2} = 1,6 + \frac{0,39 + 1,1}{2} = 2,345 \text{ мм.}$$

Подсчитывается среднее значение звена $Д_0$:

$$Д_0^{с} = Д_{1.5}^{с} + Z_{Д1.5}^{с} = 39,805 + 2,345 = 42,15 \text{ мм.}$$

По формуле (3.6) вычисляется номинальное значение звена $Д_0$:

$$Д_0 = Д_0^{с} - \frac{\Delta_{в}Д_0 + \Delta_{н}Д_0}{2} = 42,15 - \frac{0,4 - 0,7}{2} = 42,3 \text{ мм.}$$

Таким образом, расчетное значение этого звена составляет $42,3^{+0,4}_{-0,7}$ мм. Выбираем прокат диаметром $Д_{0ф} = 43^{+0,4}_{-0,7}$ мм. Фактическое значение припуска $Z_{Д1.5}$ будет

$$Z_{Д1.5ф} = Д_{0ф} - Д_{1.5} = 43^{+0,4}_{-0,7} - 40_{-0,39} = 3^{+0,79}_{-0,7} \text{ мм.}$$

Расчет технологических размеров при обработке наружной поверхности $\varnothing\, 30_{-0,033}$ *мм.* Сначала из размерной цепи $Д_{1.6}$, $Д_{5.1}$, $Z_{Д5.1}$ (рис. 6.27, *б*), в которой $Д_{5.1} = К_{Д2}$, находим $Д_{1.6}$. Для этого определяем

$$Д_{5.1}^{с} = Д_{5.1} + \frac{\Delta_{в}Д_{5.1} + \Delta_{н}Д_{5.1}}{2} = 30 + \frac{0 - 0,033}{2} = 29,9835 \text{ мм.}$$

Затем находим

$$Z_{Д5.1}^{с} = Z_{Д5.1\min} + \frac{ТД_{1.6} + ТД_{5.1}}{2} = 0,2 + \frac{0,033 + 0,16}{2} = 0,2965 \text{ мм}$$

и вычисляем

$$Д_{1.6}^{с} = Д_{5.1}^{с} + Z_{Д5.1}^{с} = 29,9835 + 0,2965 = 30,28 \text{ мм.}$$

Звено $Д_{1.6}$ записываем в виде $Д_{1.6} = 30,28 \pm 0,08$ мм.

Далее переходим к рассмотрению размерной цепи $Д_{1.4}$, $Д_{1.6}$, $Z_{Д1.6}$ (см. рис. 3.13, *б*) и из нее аналогичным образом находим $Д_{1.4}$. Для этого определяем

$$Z_{Д1.6}^{с} = Z_{Д1.6\min} + \frac{ТД_{1.4} + ТД_{1.6}}{2} = 0,5 + \frac{0,39 + 0,16}{2} = 0,775 \text{ мм}$$

и подсчитываем

$$Д_{1.4}^{с} = Д_{1.6}^{с} + Z_{Д1.6}^{с} = 30,28 + 0,775 = 31,055 \text{ мм.}$$

Таким образом, получим $Д_{1.4} = 31,055 \pm 0,195$ мм.

Так как для размеров валов, получаемых механической обработкой, в качестве номинального принято использовать наибольший предельный размер, то окончательно запишем $Д_{1.6} = 30,36_{-0,16}$ мм и $Д_{1.4} = 31,25_{-0,39}$ мм.

Теперь найдем припуск (напуск) на черновое точение. Он определится из размерной цепи, показанной на рис. 6.28. Решая обратную задачу для этой размерной цепи, получим:

$$Z_{Д1.4} = Д_{0ф} - Д_{1.4} = 43_{-0,7}^{+0,4} - 31,25_{-0,39} = 11,75_{-0,7}^{+0,79} \text{ мм.}$$

Рис. 6.28. Технологическая размерная цепь с замыкающим звеном – припуском $Z_{Д4.1}$

Снятие столь большого припуска (напуска) на одной позиции токарно-револьверной операции (см. табл. 6.7) является затруднительным; для его удаления в этой операции необходимо по крайней мере предусмотреть еще одну позицию. Припуски (напуски), снимаемые в этих двух позициях, целесообразно принять одинаковыми.

Расчет технологических размеров при обработке отверстия $\varnothing 14^{+0,027}$ *мм.* Начинаем расчет с рассмотрения размерной цепи $Д_{1.3}$, $Д_{4.1}$, $Z_{Д4.1}$ (рис. 6.27, *в*), в которой $Д_{4.1} = К_{Д3}$. Из указанной цепи находим $Д_{1.3}$. С этой целью подсчитываем

$$Д^{с}_{4.1} = Д_{4.1} + \frac{\Delta_{в}Д_{4.1} + \Delta_{н}Д_{4.1}}{2} = 14 + \frac{0,027 + 0}{2} = 14,0135 \text{ мм.}$$

Определяем

$$Z^{с}_{Д4.1} = Z_{Д4.1\min} + \frac{ТД_{1.3} + ТД_{4.1}}{2} = 0,16 + \frac{0,11 + 0,027}{2} = 0,2285 \text{ мм}$$

и вычисляем

$$Д^{с}_{1.3} = Д^{с}_{4.1} - Z^{с}_{Д4.1} = 14,0135 - 0,2285 = 13,785 \text{ мм.}$$

В итоге имеем $Д_{1.3}$ = 13,785 ± 0,055 мм.

Далее из размерной цепи $Д_{1.2}$, $Д_{1.3}$, $Z_{Д1.3}$ (рис. 3.13, *в*) точно так же находим $Д_{1.2}$, т. е. подсчитываем

$$Z^{с}_{Д1.3} = Z_{Д1.3\min} + \frac{ТД_{1.2} + ТД_{1.3}}{2} = 1,4 + \frac{0,11 + 0,27}{2} = 1,59 \text{ мм}$$

и определяем

$$Д^{с}_{1.2} = Д^{с}_{1.3} - Z^{с}_{Д1.3} = 13,785 - 1,59 = 12,195 \text{ мм.}$$

Таким образом, получим $Д_{1.2}$ = 12,195 ± 0,135 мм.

Учитывая, что для размеров отверстий, формируемых механической обработкой, в качестве номинального принято брать наименьший предельный размер, запишем: $Д_{1.3} = 13,73^{+0,11}$ мм и $Д_{1.2} = 12,06^{+0,27}$ мм.

Номинальное значение $Д_{1.2}$ целесообразно округлить, приняв окончательно $Д_{1.2} = 12^{+0,27}$ мм. Очевидно, что это приведет к незначительному увеличению припуска на зенкерование отверстия и является вполне допустимым.

Расчет продольных технологических размеров. Для расчета строится размерная схема технологического процесса изготовления втулки в продольном направлении (рис. 6.29) и граф технологических размерных цепей (рис. 6.30), облегчающий их выявление.

Рис. 6.29. Размерная схема технологического процесса изготовления втулки (продольное направление)

Технологические размерные цепи, формирующиеся при изготовлении втулки, показаны на рис. 6.31. В круглых скобках рядом с обозначе-

нием технологических размеров указаны допуски, обеспечиваемые спроектированным технологическим процессом, а рядом с обозначением припусков даны их минимальные значения.

Рис. 6.30. Граф технологических размерных цепей, формирующихся при изготовлении втулки (продольное направление)

Некоторой особенностью технологического процесса является то, что при шлифовании наружной поверхности $\varnothing 30_{-0,033}$ мм и шлифовании отверстия $\varnothing 14^{+0,027}$ мм происходят изменения продольных размеров втулки (размеров фасок). Указанные изменения при угле фасок 45° могут быть приняты равными половине удаляемых при шлифовании припусков на диаметр $Z_{Д5.1}/2$ и $Z_{Д4.1}/2$ (см. рис. 6.29). При расчете продольных технологических размеров эти припуски одновременно рассматриваются и как известные (заданные) технологические размеры. Учитывая, что $Z_{Д5.1}$ = = 0,2965 ± 0,0965 мм и $Z_{Д4.1}$ = 0,2285 ± 0,0685 мм, имеем (см. рис. 6.29 и 6.31) $A'_{5.1} = A''_{5.1} = Z_{Д5.1}/2 = 0{,}14825 \pm 0{,}04825 \approx 0{,}148 \pm 0{,}048$ мм и $A'_{4.1} = Z_{Д4.1}/2$ = = 0,11425 ± 0,03425 ≈ 0,114 ± 0,034 мм.

Рис. 6.31. Технологические размерные цепи, формирующиеся при изготовлении втулки (продольное направление)

Как видно из рис. 6.31, число составляющих звеньев в подавляющем большинстве технологических размерных цепей не превышает двух, и поэтому их расчет будем вести методом максимума-минимума. В технологической размерной цепи № 7 число составляющих звеньев равно четырем, и поэтому для ее расчета будем использовать вероятностный метод (в предположении о нормальном распределении технологических размеров и $\text{ТА}_i = 6\sigma$).

Перед началом расчета технологических размеров необходимо проанализировать технологические размерные цепи, замыкающими звеньями которых являются непосредственно не выдерживаемые конструкторские размеры, и проверить возможность их обеспечения с требуемой точностью. То есть при использовании метода максимума-минимума проверить выполнение неравенства (6.2), а при использовании вероятностного метода – неравенства (6.3).

Для размерной цепи № 2 (см. рис. 6.31)

$$\text{ТК}_2 = 0{,}62 > 0{,}5 = 0{,}3 + 0{,}2 = \text{ТА}_{1.7} + \text{ТА}_{5.1}.$$

Для размерной цепи № 3

$$\text{ТК}_3 = 0{,}52 > 0{,}35 = 0{,}15 + 0{,}2 = \text{ТА}_{3.1} + \text{ТА}_{5.1}.$$

Для размерной цепи № 4

$$\text{ТК}_4 = 0{,}4 > 0{,}32 = 0{,}12 + 0{,}2 = \text{ТА}_{1.8} + \text{ТА}_{5.1}.$$

Для размерной цепи № 5

$$\text{ТК}_5 = 0{,}8 > 0{,}396 = 0{,}3 + 0{,}096 = \text{ТА}_{2.3} + \text{ТА}''_{5.1}.$$

Для размерной цепи № 7

$$\text{ТК}_7 = 0{,}8 > 0{,}56 = \sqrt{0{,}31} = \sqrt{(0{,}3)^2 + (0{,}3)^2 + (0{,}3)^2 + (0{,}2)^2} =$$

$$= \sqrt{(\text{ТА}_{1.3})^2 + (\text{ТА}_{1.6})^2 + (\text{ТА}_{1.7})^2 + (\text{ТА}_{5.1})^2}.$$

Для размерной цепи № 8

$$\text{ТК}_8 = 0{,}8 > 0{,}396 = 0{,}3 + 0{,}096 = \text{ТА}_{1.5} + \text{ТА}'_{5.1}.$$

Для размерной цепи № 9

$$\text{ТК}_9 = 0{,}8 > 0{,}368 = 0{,}3 + 0{,}068 = \text{ТА}_{1.4} + \text{ТА}'_{1.4}.$$

Таким образом, убеждаемся, что спроектированный технологический процесс будет обеспечивать требуемую точность всех непосредственно не выдерживаемых конструкторских размеров. Более того, допуски на технологические размеры фасок $\text{ТА}_{1.4}$, $\text{ТА}_{1.5}$, $\text{ТА}_{2.3}$ целесообразно расширить с 0,3 до 0,6 мм, что позволит снизить затраты на настройку и поднастройку станков. Значения расширенных допусков на эти технологические размеры приведены на рис. 6.31 около их обозначений в квадратных скобках.

Далее нужно рассмотреть двухзвенные размерные цепи № 1 и 6 (рис. 6.31). Из этих цепей имеем $A_{2.1} = K_1 = 40_{-0,39}$ мм и $A_{2.2} = K_6 = 1 \pm 0,4$ мм.

Затем можно перейти к анализу двухзвенных цепей № 10 и 14. Из цепи № 10 определяем технологический размер $A_{1.1}$, совпадающий с припуском $Z_{1.1}$:

$$A_{1.1\min} = Z_{1.1\min} = 0,4 \text{ мм};$$

$$A_{1.1\max} = Z_{1.1\max} + TA_{1.1} = 0,4 + 0,3 = 0,7 \text{ мм};$$

$$A^{c}_{1.1} = \frac{A_{1.1\min} + A_{1.1\max}}{2} = \frac{0,4 + 0,7}{2} = 0,55 \text{ мм}.$$

Так как размер $A_{1.1}$ получается при механической обработке и не относится ни к отверстиям, ни к валам, то в качестве его номинального значения принято использовать среднее значение. Учитывая это, окончательно запишем $A_{1.1} = 0,55 \pm 0,15$ мм.

Аналогичным образом из цепи № 14 находим технологический размер $A_{5.1}$, совпадающий с припуском $Z_{5.1}$:

$$A_{5.1\min} = Z_{5.1\min} = 0,2 \text{ мм};$$

$$A_{5.1\max} = Z_{5.1\max} + TA_{5.1} = 0,2 + 0,2 = 0,4 \text{ мм};$$

$$A^{c}_{5.1} = \frac{Z_{5.1\min} + Z_{5.1\max}}{2} = \frac{0,2 + 0,4}{2} = 0,3 \text{ мм}.$$

Окончательно получим $A_{5.1} = 0,3 \pm 0,1$ мм (размер не относится ни к отверстиям, ни к валам).

После этого последовательно рассматриваем размерные цепи (рис. 6.31) с одним неизвестным технологическим размером и, используя способ средних значений, в итоге определяем его номинальное значение и предельные отклонения.

Из цепи № 2 найдем технологический размер $A_{1.7}$. Для этого подсчитываем его среднее значение:

$$A^{c}_{1.7} = K^{c}_{2} - A^{c}_{5.1} = 34 - 0,3 = 33,7 \text{ мм}.$$

Окончательно запишем $A_{1.7} = 33,7 \pm 0,15$ мм (размер не относится ни к отверстиям, ни к валам).

Из цепи № 3 аналогично найдем технологический размер $A_{3.1}$. Его среднее значение составит:

$$A^{c}_{3.1} = K^{c}_{3} - A^{c}_{5.1} = 20 - 0,3 = 19,7 \text{ мм}.$$

Окончательно запишем $A_{3.1}$= 19,7 ± 0,075 мм (размер не относится ни к отверстиям, ни к валам).

Из цепи № 4 определим технологический размер $A_{1.8}$. Среднее значение этого размера будет равно:

$$A_{1.8}^{c} = K_{4}^{c} - A_{5.1}^{c} = 3{,}2 - 0{,}3 = 2{,}9 \text{ мм.}$$

Таким образом, получим $A_{1.8}$= 2,9 ± 0,06 мм. Так как этот размер относится к отверстиям, то окончательно $A_{1.8} = 2{,}84^{+0{,}12}$ мм.

Из цепи № 5 подсчитаем технологический размер $A_{2.3}$. Его среднее значение составит:

$$A_{2.3}^{c} = K_{5}^{c} + \left(A''_{5.1}\right)^{c} = 2 + 0{,}148 = 2{,}148 \text{ мм.}$$

Предварительно запишем $A_{2.3}$ = 2,148 ± 0,3 мм. После округления номинального значения получим $A_{2.3}$ = 2,15 ± 0,3 мм (размер не относится ни к отверстиям, ни к валам).

Из цепи № 8 найдем технологический размер $A_{1.5}$. Среднее его значение определится как

$$A_{1.5}^{c} = K_{8}^{c} + (A'_{5.1})^{c} = 2 + 0{,}148 = 2{,}148 \text{ мм.}$$

Предварительно запишем $A_{1.5}$ = 2,148 ± 0,3 мм. После округления номинального значения $A_{1.5}$ = 2,15 ± 0,3 мм (размер не относится ни к отверстиям, ни к валам).

Из цепи № 9 определим технологический размер $A_{1.4}$. Его среднее значение найдется так:

$$A_{1.4}^{c} = K_{9}^{c} + \left(A'_{4.1}\right)^{c} = 1 + 0{,}114 = 1{,}114 \text{ мм.}$$

Предварительно запишем $A_{1.4}$ = 1,114 ± 0,3 мм. После округления номинального значения примем $A_{1.4}$ = 1,1 ± 0,3 мм (размер не относится ни к отверстиям, ни к валам).

Из цепи № 12 найдем технологический размер $A_{1.3}$. Для этого сперва подсчитаем

$$Z_{1.7}^{c} = Z_{1.7\,\min} + \frac{TA_{1.3} + TA_{1.7}}{2} = 0{,}2 + \frac{0{,}3 + 0{,}3}{2} = 0{,}5 \text{ мм.}$$

Затем определим среднее значение этого технологического размера

$$A_{1.3}^{c} = A_{1.7}^{c} - Z_{1.7}^{c} = 33{,}7 - 0{,}5 = 33{,}2 \text{ мм.}$$

Окончательно примем $A_{1.3}$ = 33,2 ± 0,15 мм (размер не относится ни к отверстиям, ни к валам).

Из цепи № 11 аналогично найдем технологический размер $A_{1.2}$. Определим

$$Z_{1.3}^{c} = Z_{1.3\min} + \frac{TA_{1.2} + TA_{1.3}}{2} = 0{,}4 + \frac{0{,}12 + 0{,}3}{2} = 0{,}61 \text{ мм.}$$

Подсчитаем

$$A_{1.2}^{c} = A_{1.3}^{c} - Z_{1.3}^{c} = 33{,}2 - 0{,}61 = 32{,}59 \text{ мм.}$$

Предварительно запишем $A_{1.2}$= 32,59 ± 0,06 мм. После округления номинального значения окончательно получим $A_{1.2}$= 32,6 ± 0,06 мм (размер не относится ни к отверстиям, ни к валам).

Из цепи № 13 определим технологический размер $A_{1.9}$. Для этого подсчитаем

$$Z_{2.1}^{c} = Z_{2.1\min} + \frac{TA_{1.9} + TA_{2.3}}{2} = 0{,}25 + \frac{0{,}3 + 0{,}25}{2} = 0{,}525 \text{ мм.}$$

Найдем среднее значение размера $A_{2.1}$, которое составит

$$A_{2.1}^{c} = A_{2.1} + \frac{\Delta_{в}A_{2.1} + \Delta_{н}A_{2.1}}{2} = 40 + \frac{0 - 0{,}39}{2} = 39{,}805 \text{ мм.}$$

Подсчитаем среднее значение размера $A_{1.9}$:

$$A_{1.9}^{c} = A_{2.1}^{c} + Z_{2.1}^{c} = 39{,}805 + 0{,}525 = 40{,}33 \text{ мм.}$$

Предварительно запишем $A_{1.9}$= 40,33 ± 0,15 мм. Так как этот размер относится к валам, то примем $A_{1.9} = 40{,}48_{-0{,}3}$ мм. После округления номинального значения окончательно получим $A_{1.9} = 40{,}5_{-0{,}3}$ мм.

Наконец, из цепи № 7 найдем технологический размер $A_{1.6}$. Его среднее значение будет равно

$$A_{1.6}^{c} = K_{7}^{c} + A_{5.1}^{c} + A_{1.7}^{c} - A_{1.3}^{c} = 1 + 0{,}3 + 0{,}3 + 33{,}7 = 1{,}8 \text{ (мм).}$$

Окончательно примем $A_{1.6}$= 1,8 ± 0,15 мм (размер не относится ни к отверстиям, ни к валам).

Как следует из вышеизложенного, после размерного анализа в предварительный вариант технологического процесса может потребоваться внесение некоторых изменений. Так, в рассмотренном примере, как уже упоминалось, в первой токарно-револьверной операции обтачивание заготовки до $\varnothing Д_{1.4}$ необходимо выполнить не за один переход, как в предварительном варианте технологического процесса (см. табл. 6.7), а за два перехода. Для этого нужно использовать еще одну позицию токарно-револьверного станка.

6.10. Определение режимов резания и норм времени

При назначении параметров режима резания учитывают вид обработки, тип и размеры инструмента, материал его режущей части, материал заготовки, тип и состояние станка. При этом предполагается, что инструмент имеет оптимальные геометрические параметры.

Расчет параметров режима резания применительно к точению ведется в следующей последовательности.

1. Определяется глубина резания t (мм). Ее значение стремятся принять равной максимальному припуску на обработку. При ограничениях по жесткости технологической системы (жесткости заготовки) и мощности станка припуск удаляют за несколько рабочих ходов.

2. Находится подача S (мм/об). При черновом точении подача принимается максимально допустимой по мощности станка, жесткости технологической системы, прочности режущей пластины и державки резца. При чистовом точении подачу выбирают в зависимости от требуемой шероховатости. В обоих случаях выбор подачи выполняют по рекомендациям и согласуют с паспортными данными станка.

3. Скорость резания V (м/мин) при наружном продольном и поперечном точении и растачивании рассчитывают по известной эмпирической формуле

$$V = \frac{C_v}{T^m t^x S^y} K_v .$$

При этом период стойкости T (мин) режущего инструмента выбирают по соответствующим нормативам.

По найденной скорости V рассчитывают число оборотов шпинделя станка в минуту

$$n = \frac{1000V}{\pi d_з},$$

где $d_з$ – диаметр заготовки (мм). Это число согласуют с паспортными данными станка. Причем фактическое число оборотов $n_ф$ берут ближайшим меньшим к n и затем определяют фактическую скорость резания

$$V_ф = \frac{\pi d_з n_ф}{1000}.$$

4. Определяют составляющие силы резания (P_z, P_y, P_x). Их значения (H) находят по известной формуле

$$P_{z,y,x,} = 10 C_p t^x S^y V^n K_p.$$

(Значения показателей степеней в формулах скорости резания и составляющих силы резания различны.)

5. Определяют мощность резания (квт)

$$N = \frac{P_z V}{1020 \cdot 60}.$$

Находят мощность на приводе станка

$$N_{\text{пр}} = \frac{N}{\eta},$$

где η – КПД привода, который берется по паспорту станка. Мощность на приводе станка сопоставляется с мощностью электродвигателя привода главного движения станка $N_{\text{ст}}$. Если $N_{\text{пр}} > N_{\text{ст}}$, то можно снизить скорость резания.

При многоинструментной обработке, когда одновременно работает несколько инструментов, период стойкости следует увеличивать по сравнению с одноинструментной обработкой. Это необходимо делать и при многостаночном обслуживании.

Ориентировочно можно считать, что период стойкости при многоинструментной обработке

$$T_{\text{ми}} = TK_{\text{Ти}},$$

и при многостаночном обслуживании

$$T_{\text{мс}} = TK_{\text{Тс}},$$

где T – стойкость лимитирующего инструмента, под которым понимается инструмент, обрабатывающий участок наибольшего диаметра и длины; $K_{\text{Ти}}$ – коэффициент изменения периода стойкости при многоинструментной обработке; $K_{\text{Тс}}$ – коэффициент изменения периода стойкости при многостаночном обслуживании. Значения этих коэффициентов приведены в табл. 6.8 и 6.9

Таблица 6.8

Коэффициент изменения периода стойкости $K_{\text{Ти}}$ в зависимости от числа одновременно работающих инструментов

Число работающих инструментов	1	3	5	8	10	15
$K_{\text{Ти}}$	1	1,7	2	2,5	3	4

Примечания. 1. При равномерной загрузке инструментов коэффициент $K_{\text{Ти}}$ увеличивать в 2 раза.

2. При загрузке инструментов с большой неравномерностью коэффициент $K_{\text{Ти}}$ уменьшать на 25–30 %.

Таблица 6.9

Коэффициент изменения периода стойкости $K_{Тс}$ в зависимости от числа одновременно обслуживаемых станков

Число обслуживаемых станков	1	2	3	4	5	6	7 и более
$K_{Тс}$	1,0	1,4	1,9	2,2	2,6	2,8	3,1

При шлифовании параметры режима резания выбирают по рекомендациям, содержащимся в справочной литературе. Мощность рассчитывают по эмпирическим формулам.

Нормы времени на операции обработки резанием определяют с использованием зависимостей, приведенных в разд. 1. Основное время находят по переходам. При параллельном выполнении переходов основное время принимают равным наиболее длительному переходу. Вспомогательное время определяют с помощью нормативов по элементам, которые не перекрываются основным временем. Остальные составляющие нормы штучного времени берутся в процентах от оперативного времени. Подготовительно-заключительное время находят по нормативам.

Зная содержание операций, по тарифно-квалификационным справочникам устанавливают разряды рабочих.

6.11. Определение технико-экономических показателей технологического процесса

Технологический процесс изготовления детали может быть разработан в нескольких вариантах, которые в той или иной степени могут отличаться друг от друга, но обеспечивать все технические требования, предъявляемые к детали. Для выбора наиболее рационального из этих вариантов необходимо сравнить их технико-экономические показатели.

На ранних стадиях разработки технологического процесса используют частные показатели.

При выборе метода получения исходной заготовки определяют коэффициенты использования материала

$$K_{им} = m_{д} / m_{из},$$

где $m_{д}$, $m_{из}$ – массы детали и исходной заготовки. Предпочтение отдается методу, обеспечивающему больший $K_{им}$. При этом подсчитывают ожидаемое снижение материалоемкости выпуска деталей

$$\Delta M = (m_{из_1} - m_{из_2})N,$$

где $m_{из_1}$, $m_{из_2}$ – массы исходных заготовок в сравниваемых вариантах их получения; N – объем выпуска деталей.

На этапе разработки технологического процесса изготовления детали определяют коэффициент основного времени. Его находят следующим образом:

- для операции

$$\eta_0 = t_{\text{о}i} / t_{\text{ш}i};$$

- всего технологического процесса

$$\eta_0 = \frac{\sum_{i=1}^{m} t_{\text{о}i}}{\sum_{i=1}^{m} t_{\text{ш}i}},$$

где $t_{\text{о}i}$, $t_{\text{ш}i}$ – основное и штучное время i-й операции; m – число операций в технологическом процессе. Чем выше значение η_0, тем производительнее используются станки.

На этом этапе также находят трудоемкость обработки детали

$$T_{\text{д}} = \sum_{i=1}^{m} t_{\text{ш}i}.$$

В серийном производстве подсчитывают трудоемкость обработки партии деталей

$$T_n = n\sum_{i=1}^{m} t_{\text{ш}i} + \sum_{i=1}^{m} t_{\text{пз}i},$$

где $t_{\text{пз}i}$ – подготовительно-заключительное время i-й операции; n – число деталей в партии.

На завершающем этапе разработки технологического процесса проводят оценку его вариантов путем сравнения себестоимости изготовления деталей, отражающей затраты живого и овеществленного труда.

Если в сравниваемых вариантах технологического процесса дополнительные капитальные вложения (например, приобретение нового оборудования) не требуется, то экономию определяют по формуле

$$\text{Э} = (\text{С}_1 - \text{С}_2)N,$$

где С_1, С_2, – себестоимости деталей, изготавливаемых по сравниваемым вариантам.

Если реализация вариантов технологического процесса требует дополнительных капитальных вложений, то подсчитывают коэффициент сравнительной эффективности

$$E = \frac{\text{С}_{\text{г}_1} - \text{С}_{\text{г}_2}}{K_2 - K_1},$$

где $\text{С}_{\text{г}_1}$, $\text{С}_{\text{г}_2}$ – себестоимость годового выпуска деталей по сравниваемым вариантам; K_1, K_2 – дополнительные капитальные вложения по ним.

В том случае, если $E \geq E_н$ ($E_н$ – нормативный коэффициент эффективности, равный для машиностроения 0,2), выгоднее второй вариант технологического процесса. При $E < E_н$ эффективнее первый вариант.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Как классифицируются технологические процессы?
2. Какова последовательность разработки единичного технологического процесса изготовления детали?
3. Как определяется тип производства при разработке технологического процесса изготовления детали?
4. Каким требованиям должна удовлетворять конструкция детали для обеспечения технологичности?
5. Какие размеры должны быть указаны на чертеже детали, некоторые поверхности которой не подвергаются обработке?
6. От каких факторов зависит вид и способ получения исходной заготовки?
7. Каким требованиям должна удовлетворять конструкция исходной заготовки для обеспечения технологичности?
8. Что такое комплексная заготовка?
9. Назовите принципы выбора технологических баз и поясните их сущность.
10. На что влияет выбор технологических баз при выполнении первой операции?
11. Как следует выбирать технологические базы для выполнения первой операции?
12. Как выбирают маршруты обработки отдельных поверхностей детали?
13. Как формируют операции технологического процесса изготовления детали?
14. Какими соображениями руководствуются при выборе станков, приспособлений и инструментов?
15. Как рассчитывают минимальные припуски на обработку?
16. Как определяют допуски технологических размеров?
17. Как влияет погрешность установки заготовки на допуски технологических размеров?
18. Из каких условий производится расчет технологических размеров?
19. Какова последовательность расчета параметров режима резания при черновой и чистовой обработках?
20. Как оценивают экономическую эффективность вариантов технологического процесса изготовления детали?

7. ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИИ СБОРКИ ИЗДЕЛИЙ

7.1. Общие положения. Классификация соединений составных частей изделия и видов сборки

Сборка является завершающим этапом производства машин и в значительной мере определяет их качество. Достаточно запрессовать подшипник качения с небольшим перекосом или слабо затянуть резьбовое соединение, чтобы нарушить нормальную работу машины и вызвать быстрый выход ее из строя.

Сборка отличается высокой трудоемкостью, которая составляет примерно от 20 до 50 % от общей трудоемкости изготовления изделий. Основная часть (50…55 %) слесарно-сборочных работ представляет собой ручные работы, требующие больших физических усилий и высокой квалификации рабочих; автоматизировано в настоящее время лишь 6…7 % от общего объема сборочных работ. Поэтому актуальной задачей машиностроения является механизация и автоматизация сборки.

Под *технологическим процессом сборки* понимают технологический процесс, содержащий действия по установке и образованию соединений составных частей заготовки или изделия.

Сборочной операцией называют технологическую операцию установки и образования соединений составных частей заготовки или изделия.

По сохранению целостности при разборке соединения делят на *разъемные* и *неразъемные*. Разборка первых происходит без нарушения целостности составных частей изделия; при разборке вторых эта целостность нарушается.

По возможности относительного перемещения различают *подвижные* и *неподвижные* соединения. В подвижных соединениях имеется возможность относительного перемещения составных частей изделия; в неподвижных соединениях такой возможности нет.

По форме сопрягаемых поверхностей выделяют следующие соединения: *плоское, цилиндрическое, коническое, сферическое, винтовое, профильное*.

По методу образования различают соединения: *резьбовое, клиновое, штифтовое, шпоночное, шлицевое, сварное, паяное, клепаное, клееное, фланцевое, ниппельное, штуцерное, прессовое, фальцованное, развальцованное, комбинированное*.

Сборку делят на узловую и общую. Под *узлом* понимают сборочную единицу, которая может собираться отдельно от других составных частей изделия или изделия в целом и выполнять определенную функцию в из-

делиях одного назначения только совместно с другими составными частями. Если сборочная единица обладает полной взаимозаменяемостью, возможностью сборки отдельно от других составных частей изделия или изделия в целом и способностью выполнять определенную функцию в изделии или самостоятельно, то ее называют *агрегатом*. Например, в автомобиле агрегатом является двигатель. Сборка изделия или его составной части из агрегатов носит название *агрегатной*.

По стадиям процесса выделяют следующие виды сборок:

- предварительную;
- промежуточную;
- под сварку;
- окончательную.

Предварительная сборка – это сборка заготовок, составных частей или изделия в целом, которые в последующем подлежат разборке. Предварительную сборку, например, производят для определения размера неподвижного компенсатора.

Промежуточная сборка – это сборка заготовок, выполняемая для дальнейшей их совместной обработки. Например, промежуточной сборке подвергают корпус редуктора с крышкой для совместной обработки отверстий под подшипники, прилегающих к отверстиям плоскостей и крепежных отверстий для крышек подшипников.

Сборка под сварку выполняется для придания требуемого взаимного положения соединяемых ею составных частей изделия, которые устанавливают и закрепляют в специальных приспособлениях.

Окончательная сборка – это сборка изделия или его составной части, после которой не предусмотрена их последующая разборка при изготовлении.

Однако после окончательной сборки крупных уникальных изделий тяжелого машиностроения (крупные паровые и гидравлические турбины, металлорежущие станки, прессы) их частично разбирают для транспортировки потребителю.

По механизации и автоматизации процесса сборка делится на *ручную, механизированную, автоматизированную* и *автоматическую*. При автоматизированной сборке управление средствами технологического оснащения ведется частично без участия людей, при автоматической – без непосредственного участия людей.

К сборке кроме собственно сборочных работ, направленных на формирование соединений составных частей изделия, относят и ряд других. Виды работ, выполняемых при сборке изделий, и их трудоемкость представлены в табл. 7.1.

Таблица 7.1

Виды работ, выполняемых при сборке [7]

Вид работ	Краткая характеристика	Удельный вес в общей трудоемкости сборки, %	
		в мелкосерийном производстве	в массовом производстве
Подготовительные	Работы по приведению деталей, а также покупных изделий в состояние, требуемое условиями сборки: деконсервирование, мойка, сортирование на размерные группы, укладка в тару и др.	5…7	8…10
Пригоночные	Работы, связанные с обеспечением собираемости соединений и технических требований к ним: опиливание и зачистка, притирка, полирование, шабрение, сверление, развертывание, правка	20…25	--
Собственно сборочные	Работы по соединению двух или большего числа деталей с целью получения сборочных единиц и изделий основного производства: свинчиванием, запрессовыванием, клепкой и др.	44…47	70…75
Регулировочные	Работы, проводимые в процессе сборки или после ее окончания с целью достижения требуемой точности по взаиморасположению деталей в сборочных единицах и изделии	7…9	6…7
Контрольные	Работы, выполняемые в процессе сборки и после ее окончания с целью проверки соответствия сборочных единиц и изделий параметрам, установленным чертежом и техническими условиями на сборку	10…12	8…10
Демонтажные	Работы по частичной разборке собираемого изделия с целью подготовки его к упаковке и транспортировки к потребителю	6…8	3…4

7.2. Организационные формы сборки

Организационная форма сборки определяется типом производства, а также габаритами и массой собираемых изделий.

Сборка делится на *поточную* и *непоточную*. Характерным для поточной сборки является непрерывное или периодическое движение собираемых изделий или рабочих-сборщиков с соблюдением заданного такта. Сборка, выполняемая без соблюдения этих условий, относится к непоточной.

При сборке изделие может оставаться на одном месте (сборочном стенде, на полу цеха) или перемещаться периодически или непрерывно, например, с помощью конвейера. В первом случае сборку называют *стационарной*, во втором – *подвижной*.

Организационные формы сборки укрупненно можно представить в виде схемы, показанной на рис. 7.1.

Рис. 7.1. Организационные формы сборки

Непоточная стационарная сборка характеризуется тем, что собираемое изделие от начала до конца сборки остается на одном рабочем месте, к которому доставляются детали, узлы и агрегаты. Сборку выполняет рабочий или бригада рабочих. Рабочие места оснащают соответствующим оборудованием (прессы, металлорежущие станки и др.), универсальными приспособлениями и подъемно-транспортными средствами.

Сборочные работы при непоточной стационарной сборке включают разнообразные переходы и операции, что предъявляет высокие требования к квалификации рабочих. Сборочные переходы приходится в значительной части выполнять последовательно, что удлиняет цикл сборки и снижает другие ее технико-экономические показатели.

Областью экономичного использования непоточной стационарной сборки является единичное и мелкосерийное производство.

Непоточная подвижная сборка отличается тем, что собираемое изделие периодически перемещается от одного рабочего места к другому. Сборочные операции выполняют отдельные рабочие или бригады рабочих, специализирующиеся на определенных работах.

Рабочие места связывают с помощью транспортных устройств (рольгангов, рельсовых тележек и др.). Окончив выполнение операции, рабочий перемещает изделие к следующему рабочему месту. При небольших размерах собираемых изделий это может делаться и вручную. Для компенсации колебаний затрат времени на выполнение сборочных операций между рабочими местами создают заделы собираемых изделий.

Рабочие места оборудуют верстаками, сборочными приспособлениями и инструментами, контрольно-измерительными инструментами, стеллажами для деталей и узлов.

Более высокое техническое оснащение рабочих мест и их специализация способствует повышению производительности труда, качества сборки и сокращению ее цикла.

Непоточную подвижную сборку применяют в условиях серийного производства.

Поточная стационарная сборка характеризуется тем, что все собираемые изделия на протяжении всей сборки остаются на одних рабочих местах. Рабочие же или их бригады по сигналу одновременно переходят от одних собираемых изделий к другим через промежутки времени, равные такту. Каждый рабочий (или бригада) выполняет закрепленную за ним одну и ту же операцию на каждом из собираемых изделий, к которым доставляются детали и узлы.

Узкая специализация рабочих обеспечивает повышение качества сборки и производительности труда.

Областью экономичного использования поточной стационарной сборки является серийное производство машин больших габаритов и массы (автомобили большой грузоподъемности, самолеты и т. п.).

Поточная подвижная сборка отличается тем, что собираемое изделие непрерывно (в течение такта) или периодически (через такт) перемещается от одного рабочего места к другому, на которых выполняется одна сборочная операция.

Для перемещения собираемых изделий используют различные конвейеры (ленточные, цепные и др.). Ленточные конвейеры используют при сборке изделий небольших габаритов и массы, например, часов, небольших электродвигателей, карбюраторов и т. п. Цепные конвейеры осуществляют перемещение рельсовых тележек с установленными на них приспособлениями, в которых закрепляют собираемые изделия. В массовом производстве широко применяют подвесные цепные конвейеры, которые позволяют освободить площадь пола и улучшить условия работы сборщиков.

При поточной подвижной сборке рабочие места располагают по обе стороны конвейера и оснащают приспособлениями, монтажно-сборочным и измерительным инструментами, стеллажами для деталей и узлов. Если конвейер находится в непрерывном движении, сборщик выполняет операцию, следуя за конвейером, а затем возвращается в исходное положение.

Поточная подвижная сборка по сравнению с непоточной обеспечивает более высокие технико-экономические показатели. Например, на Волжском автомобильном заводе (ВАЗ), на котором сборка легковых автомобилей производится на непрерывно движущемся подвесном цепном конвейере длиной около 2 км, такт выпуска составляет 1 мин.

Областью экономичного использования поточной подвижной сборки является крупносерийное и массовое производство.

7.3. Сборка типовых соединений

7.3.1. Сборка резьбовых соединений

Резьбовые соединения в машинах составляют от 15 до 25 % от общего количества соединений. Такая распространенность объясняется их простотой, высокой прочностью, надежностью, удобством сборки и разборки, наличием большого многообразия стандартных резьбовых деталей и их взаимозаменяемостью.

Основными видами резьбовых соединений являются шпилечные, болтовые и винтовые (рис. 7.2).

Процесс сборки резьбового соединения в общем случае складывается из следующих основных этапов: наживления (предварительного завинчивания на 1–2 витка шпилек, винтов, гаек), завинчивания и затяжки. При автоматической сборке все эти этапы выполняются последовательно одним инструментом. При механизированной сборке наживление для исключения возможности повреждения резьб часто производят вручную.

а *б* *в*

Рис. 7.2. Виды резьбовых соединений

Надежность резьбовых соединений, особенно тяжело нагруженных, очень существенно зависит от того, насколько правильно выполнена их затяжка. Напряжение растяжения в шпильке, болте или винте при затяжке должно составлять: для резьбовых деталей из углеродистой стали $\sigma_р = (0,6...0,7)\sigma_т$; для деталей из легированной стали $\sigma_р = (0,5...0,6)\sigma_т$.

Для контроля затяжки измеряют обычно один из следующих параметров: крутящий момент, угол поворота гайки, удлинение стержня болта или шпильки. Применяют также комбинированные методы контроля.

В большинстве случаев при затяжке контролируют крутящий момент, предельные значения которого указываются в технических требованиях на сборку ответственных резьбовых соединений. С этой целью

при ручной сборке применяют динамометрические ключи, а при механизированной (автоматизированной) сборке – резьбозавертывающие инструменты с ограничительными муфтами.

Сборка шпилечных соединений. Она состоит из следующих этапов: завинчивания шпильки в резьбовое отверстие корпуса с заданным крутящим моментом; установки на шпильки присоединяемой к корпусу детали; установки шайб и завинчивания гаек с заданным крутящим моментом.

Неподвижность шпильки, ввинченной в корпус, обычно достигается натягом в соединении. Натяг обеспечивается в большинстве случаев за счет: сбега резьбы на шпильке (рис. 7.3, *а*), упорного бурта на ней (рис. 7.3, *б*) и соответствующей посадки по среднему диаметру резьбы (рис. 7.3, *в*).

Рис. 7.3. Обеспечения неподвижности шпильки в корпусе

В первом варианте шпилька завинчивается свободно до сбега резьбы, при дальнейшем завинчивании в витках сбега возникают расклинивающие силы, создающие необходимый натяг. Прочность такого соединения преимущественно зависит от механических свойств материалов корпуса и шпильки, угла сбега резьбы (см. рис. 7.3, *а*) и момента завинчивания. Для стальных шпилек и корпусов из алюминиевых и магниевых сплавов угол сбега обычно составляет 20 °. При стальных корпусах для большей прочности соединения угол сбега уменьшают. Этот вариант постановки шпилек имеет существенные недостатки – расклинивающие силы нередко приводят к чрезмерному смятию начальных витков резьбы в

отверстии и образованию около него микротрещин, особенно если корпус выполнен из чугуна. Поэтому использование сбега резьбы для обеспечения неподвижности шпильки в корпусе применяют лишь в соединениях, не подверженных большим силовым нагрузкам и вибрациям.

Во втором варианте натяг в соединении «шпилька-корпус» создается за счет упорного бурта на шпильке при ее затяжке. Однако при последующей затяжке гайки шпилька неизбежно удлиняется и этот натяг и прочность удержания шпильки в корпусе снижаются.

В третьем варианте неподвижность соединения «шпилька-корпус» достигается за счет натяга по среднему диаметру этого резьбового соединения. Этот вариант постановки шпилек нашел наиболее широкое применение. Посадки с натягом рекомендованы ГОСТ 4608-81, который распространяется на метрические резьбы диаметром 5…45 мм и шагом 0,8…3 мм. Точность посадок с натягом в большинстве случаев достигается методом групповой взаимозаменяемости. Для устранения заклинивания при свинчивании резьбы с натягом по наружному и внутреннему диаметрам предусмотрены гарантированные зазоры. При установлении этих зазоров учтено, что при свинчивании вследствие пластической деформации витков наружный диаметр резьбы шпильки увеличивается, а внутренний диаметр резьбы в корпусе уменьшается. Для снижения трения завинчивание шпилек выполняют с применением смазочного материала (например, масел с графитом или дисульфидом молибдена).

При завинчивании шпилек их захватывают либо за резьбовую часть, либо за гладкую. Последнее является предпочтительным, так как исключает возможность повреждения резьбы.

Ручной ключ для захвата шпильки за резьбовую часть показан на рис. 7.4, *а*. Он содержит головку *1*, навинчиваемую на шпильку, и размещенный в отверстии головки *1* стержень *2* с запрессованным в него штифтом *3*, концы которого взаимодействуют с наклонными пазами в головке *1*. При повороте рукоятки ключа по часовой стрелке торец стержня *2* нажимает на торец шпильки и фиксирует ее. При обратном повороте рукоятки ключа торец стержня *2* отходит от шпильки и освобождает ее.

На рис. 7.4, *б* показан ручной роликовый ключ для захвата шпильки за гладкую часть. Головка *1* ключа содержит спиральные канавки, в которых размещены три ролика *2*, удерживаемые свободно установленной в головке *1* обоймой *3*. При повороте головки *1* по часовой стрелке ролики *2* охватывают с трех сторон гладкую часть шпильки и обеспечивают ее вращение вместе с рукояткой ключа. При повороте рукоятки ключа в обратном направлении ролики *2* отходят от шпильки и освобождают ее.

Рис. 7.4. Ключи для завинчивания шпилек

Описанные инструменты применяют в единичном и мелкосерийном производствах. С увеличением объема выпуска изделий операции постановки шпилек механизируют и автоматизируют. В крупносерийном и массовом производствах эти операции выполняют на полуавтоматах, автоматах и автоматических линиях, оснащенных многошпиндельными шпильковертами.

Сборка болтовых и винтовых соединений. При сборке болтовых соединений болт с надетой шайбой вставляют в отверстия соединяемых деталей и удерживают его от выпадения и провертывания (рис. 7.5, *а*), а затем устанавливают шайбы и завинчивают гайку с заданным крутящим моментом (рис. 7.5, *б*).

Затяжку гаек в многоболтовом (шпилечном) соединении (если она выполняется вручную или с помощью механизированного одношпиндельного гайковерта) нужно выполнять в определенной последовательности. Общий принцип – затягивать сначала средние гайки, затем пару соседних справа и пару соседних слева и т. д., постепенно приближаясь к краям соединяемых деталей по спирали (рис. 7.6). Если гайки расположены по окружности, то их следует затягивать крест-накрест. Нарушение этого принципа может привести к деформациям соединяемых деталей и их неплотному стыку.

Рис. 7.5. Схема сборки болтового соединения

При использовании многошпиндельных гайковертов затяжка всех гаек осуществляется одновременно с установленным крутящим моментом.

I вариант

II вариант

Рис. 7.6. Последовательность затяжки гаек

Сборка винтовых соединений по сравнению с болтовыми и шпилечными является значительно более простой. После установки соединяемых деталей в требуемое положение винт подается в их отверстия и завинчивается с заданным крутящим моментом.

Рис. 7.7. Схема устройства для автоматического завинчивания винтов

На рис. 7.7 показана схема устройства для автоматического завинчивания винтов. Винт *1* подается по желобу *2* через боковое окно в неподвижной трубке *3* питателя и удерживается в ней с помощью трех поворотных кулачков *4*. При опускании вращающейся отвертки *5* винт *1* преодолевает сопротивление упругого кольца *6*, ввинчивается в отверстие детали *7* и соединяет ее с деталью *8*. После затяжки винта *1* отвертка *5* и кулачки *4* возвращаются в исходное положение.

7.3.2. Сборка прессовых соединений

Прессовые соединения (соединения с натягом) имеют широкое распространение в машиностроении (10…17 % от общего числа соединений). Это объясняется их высокой надежностью, простотой конструкции деталей и их сборки.

Относительная неподвижность деталей в прессовом соединении (рис. 7.8) обеспечивается силами трения, возникающими под действием контактного давления в этом соединении.

Сборка прессовых соединений может осуществляться: запрессовкой одной детали в другую; термовоздействием на соединяемые детали (нагревом охватывающей детали или охлаждением охватываемой, или одновременным нагревом охватывающей детали и охлаждением охватываемой); гидропрессовым способом, при котором в зону сопряжения деталей подается масло под высоким давлением.

Рис. 7.8. Схема прессового соединения

Соединения, получаемые запрессовкой одной детали в другую, называют *продольно-прессовыми*, а получаемые за счет термовоздействия на детали – *поперечно-прессовыми*.

Продольно-прессовые соединения. Получить такие соединения наиболее просто, что объясняет их наибольшее распространение. Продольно-прессовые соединения применяют при относительно небольших натягах:

$$N_{\max} \le 0{,}001d,$$

где d – номинальный диаметр соединения.

Для обеспечения необходимого качества продольно-прессовых соединений требуется выполнение ряда условий. Сопрягаемые поверхности должны быть тщательно промыты и протерты, на них не должно быть забоин и заусенцев. Шероховатость сопрягаемых поверхностей должна, как правило, соответствовать $Ra \le 1{,}25$ мкм. Детали должны иметь соответствующие фаски. Угол фаски (угол между ее образующей и осью детали) у запрессовываемой детали должен быть не более 10 °, а у второй детали – не более 20…30 °; сопрягаемые поверхности перед запрессовкой должны быть смазаны. Скорость запрессовки $V_{\text{зап}}$ обычно не превышает 10 мм/с; наибольшая прочность соединения обеспечивается при $V_{\text{зап}} = 2\ldots3$ мм/с.

Для исключения перекосов сопрягаемых деталей при запрессовке необходимо использовать специальные приспособления. В качестве примера на рис. 7.9 показано приспособление для запрессовки втулки в корпус. Втулку *1* устанавливают на оправку *2*, которая направляется полым пальцем *3*. При опускании штока пресса оправка *2* перемещается вместе со втулкой *1* и запрессовывает ее в отверстие корпуса *4*.

Рис. 7.9. Схема приспособления для запрессовки втулок

Запрессовку выполняют с помощью различных прессов (рис. 7.10), которые выбирают исходя из усилия запрессовки (коэффициент запаса принимают равным 1,5…2) и габаритов соединяемых деталей.

Рис. 7.10. Типы сборочных прессов

Необходимое усилие запрессовки рассчитывают по формуле

$$P_{\text{зап}} = f\pi dlp,$$

где f – коэффициент трения между сопрягаемыми поверхностями; d – номинальный диаметр соединения; l – его длина; p – давление на поверхности контакта деталей.

Это давление определяют по формуле

$$p = \frac{N_{\max}}{d\left(\frac{C_1}{E_1} + \frac{C_2}{E_2}\right)},$$

где $N_{\max}$ – максимальный натяг в соединении; C_1 и C_2 – коэффициенты Ляме соответственно для охватываемой и охватывающей деталей; E_1 и E_2 – модули упругости материалов соответственно охватываемой и охватывающей деталей.

Коэффициенты Ляме находятся из соотношений

$$C_1 = \frac{1 + \left(\frac{d_1}{d}\right)^2}{1 - \left(\frac{d_1}{d}\right)^2} - \mu_1;$$

$$C_2 = \frac{1 + \left(\frac{d}{d_2}\right)^2}{1 - \left(\frac{d}{d_2}\right)^2} + \mu_2,$$

где d_1 – диаметр отверстия охватываемой детали; d_2 – наружный диаметр охватывающей детали; μ_1 и μ_2 – коэффициенты Пуассона материалов соответственно охватываемой и охватывающей деталей.

Коэффициент трения, который необходимо знать для расчета усилия запрессовки, зависит от многих факторов: материалов сопрягаемых деталей, шероховатости сопрягаемых поверхностей, давления на контактной поверхности, а также наличия и вида смазочного материала. При запрессовке металлических деталей он может изменяться от 0,02 до 0,22. Его численные значения приводятся в специальной литературе.

Усилие распрессовки, по которому обычно оценивают прочность прессового соединения, оказывается больше, чем усилие запрессовки на 10…15 %.

Усилие запрессовки (распрессовки) можно очень существенно уменьшить, обеспечив введение масла на поверхность сопряжения. Такой способ, основанный на создании между контактирующими поверхностями деталей в процессе сборки или разборки масляной прослойки, носит название гидропрессового и находит все более широкое применение при диаметрах сопряжений $d \geq 100$ мм. Давление масла при этом достигает 100…200 МПа.

Рис. 7.11. Схема гидропрессовой сборки

На рис. 7.11 показана одна из возможных схем гидропрессовой сборки вала со втулкой, при которой подвод масла осуществляется с торца соединения. После входа вала в отверстие втулки на небольшую величину, обеспечиваемого обычной запрессовкой, масло под большим давлением через фаски деталей подается в зону их контакта, вызывая увеличение диаметра отверстия втулки и уменьшение диаметра вала и разделяя их поверхности, что позволяет резко снизить усилие запрессовки.

К недостаткам гидропрессовой сборки относится необходимость применения сложных устройств для обеспечения герметичности и восприятия распорных сил.

Следует особо отметить, что если вместо гидропрессовой сборки во многих случаях можно использовать, например, сборку с термовоздействием, то разборку прессовых соединений крупных деталей, собранных с большими натягами, без их повреждения часто можно выполнить только гидропрессовым способом.

На рис. 7.12 приведены схемы прессового соединения и его гидропрессовой разборки. В охватывающей детали (рис. 7.12, *а*) выполняют радиальное отверстие для подвода масла и канавку, через которые оно под высоким давлением поступает в зону контакта деталей и разделяет их (рис. 7.12, *б*), что позволяет в десятки раз снизить усилие выпрессовки ($P_{вып}$), исключить повреждения деталей и использовать их для повторной сборки.

Рис. 7.12. Схемы прессового соединения (а) и его гидропрессовой разборки (б)

При сборке прессовых соединений диаметр отверстия охватываемой детали d_1 уменьшается, а наружный диаметр охватывающей детали d_2 возрастает (см. рис. 7.8). При этом точность отверстий охватываемых и наружной поверхности охватывающих деталей неизменно снижается. Поэтому после сборки прессовых соединений эти поверхности часто подвергают чистовой обработке. Например, после запрессовки подшипниковых втулок в корпус их отверстия подвергают развертыванию или тонкому растачиванию.

Наибольшие изменения диаметров d_1 и d_2 (Δd_1 и Δd_2) при сборке прессовых соединений, соответствующие максимальному натягу N_{max} и контактному давлению p, в соединении можно вычислить по формулам:

$$\Delta d_1 = \frac{2pd_1d^2}{E_1(d^2 - d_1^2)};$$

$$\Delta d_2 = \frac{2pd_2d^2}{E_2(d_2^2 - d^2)}.$$

Поперечно-прессовые соединения. Получение таких соединений, как отмечалось, обеспечивается термовоздействием на сопрягаемые детали. Сборка с термовоздействием повышает прочность собранных соединений в 1,5…2,5 раза по сравнению с соединениями, полученными запрессовкой. Это объясняется тем, что при сборке с термовоздействием микронеровности сопрягаемых поверхностей не сглаживаются, а сцепляются друг с другом (рис. 7.13). Незначительные сборочные силы при сборке с термовоздействием уменьшают локальные деформации соединяемых деталей и обеспечивают высокую точность соединений. Таким образом, сборка с термовоздействием имеет важные преимущества перед сборкой, выполняемой обычной запрессовкой, и нашла широкое применение, особенно при получении ответственных соединений. Ее используют как при малых, так и больших натягах.

Рис. 7.13. Схема контактирования микронеровностей в поперечно-прессовом соединении

Для облегчения процесса сборки температурные деформации деталей должны не только превышать максимальный натяг в соединении $N_{\max}$, но и обеспечивать монтажный зазор Δ. Этот зазор рекомендуется выбирать: для диаметров 30…40 мм – (0,0006…0,0007)*d*; для диаметров 40…100 мм – (0,0007…0,0011)*d*. При автоматической сборке монтажный зазор должен быть не менее 0,03 мм, чтобы обеспечить надежное соединение деталей наиболее простыми исполнительными механизмами.

Температуру нагрева или охлаждения собираемых деталей определяют по формуле

$$t = \left(N_{\max} + \Delta\right) / \alpha d,$$

где $N_{\max}$, Δ – соответственно максимальный натяг и монтажный зазор, мм; α – коэффициент линейного расширения (сжатия) материала детали, 1/°С; d – диаметр соединения, мм.

Ниже приведены значения α (1/°С) для различных материалов при нагреве (числитель) и охлаждении (знаменатель):

Стали и стальное литье	$11 \cdot 10^{-6}/–8{,}5 \cdot 10^{-6}$
Серый и ковкий чугуны	$10 \cdot 10^{-6}/–8 \cdot 10^{-6}$
Медь	$16 \cdot 10^{-6}/–14 \cdot 10^{-6}$
Бронзы	$17 \cdot 10^{-6}/–15 \cdot 10^{-6}$
Латуни	$18 \cdot 10^{-6}/–16 \cdot 10^{-6}$
Алюминиевые сплавы	$22 \cdot 10^{-6}/–18 \cdot 10^{-6}$
Магниевые сплавы	$26 \cdot 10^{-6}/–21 \cdot 10^{-6}$

При перемещении детали из нагревающего или охлаждающего устройства неизбежно некоторое изменение (понижение или повышение) ее температуры. Ориентировочно можно считать, что это изменение температуры составляет 25…30 °С. С учетом этого приведенная выше формула принимает вид

$$t = \left(N_{\max} + \Delta\right) / \alpha d \pm 25\ldots30\ ^\circ\text{C}.$$

Конечная температура детали будет составлять $t + t_{\text{н}}$ при нагреве и $t - t_{\text{н}}$ при охлаждении, где $t_{\text{н}}$ – начальная температура детали.

В зависимости от величины натяга N_{max}, монтажного зазора, диаметра сопряжения и конструкции деталей их нагрев осуществляется разными методами: в кипящей воде; в горячем масле (120 °С); газовыми горелками; в нагревательных печах; с помощью электроконтактных и индукционных нагревателей. Температура нагрева стальных деталей для исключения окисления поверхностных слоев и снижения твердости не должна превышать 300…350 °С.

Для охлаждения деталей применяют, как правило, жидкий азот или твердую углекислоту (сухой лед), имеющие соответственно температуры –190…–196 °С и –75…–80 °С.

Рис. 7.14. Устройство для автоматической сборки охлажденной втулки с нагретым корпусом

Следует иметь в виду, что при охлаждении закаленных деталей из сталей перлитного класса (У7, У12, 9ХС, ШХ15 и др.) до низких температур остаточный аустенит превращается в мартенсит с резким увеличением объема. Например, у валов диаметром 50 мм из стали ХВГ с содержанием аустенита от 13 до 45 % увеличение диаметра составляет от 0,07 до 0,25 мм. Такие деформации обычно являются недопустимыми. Их можно избежать, если сразу после закалки деталей их подвергнуть обработке холодом.

Сборка с термовоздействием затруднена, если диаметр соединения $d \leq 15$ мм. В этом случае температурные деформации часто оказываются недостаточными для обеспечения возможности сборки с требуемым натягом в соединении. При диаметре соединения от 15 до 40 мм термовоздействию необходимо, как правило, подвергать обе детали. Поэтому сборку с термовоздействием рекомендуется применять при $d \geq 40$ мм. При этом нужно иметь в виду, что сборка с охлаждением охватываемой детали обеспечивает прочность соединения на 10…15 % выше, чем сборка с нагревом охватывающей детали.

Недостатком сборки с термовоздействием является образование после нее так называемого температурного зазора, который возникает, например, между буртом вала и торцом соединенной с ним втулки.

Сборка как продольно-, так и поперечно-прессовых соединений достаточно просто может быть автоматизирована. На рис. 7.14 показано устройство для автоматической сборки предварительно охлажденной втулки с предварительно нагретым корпусом [4]. Корпус *2* и втулку *7* устанавливают манипулятором на ступенчатый ловитель *1*. При перемещении толкателя *6* вниз его нижняя часть с распылительными отверстиями входит в отверстие втулки *7*, которое герметизируется прокладками *3* и *4*. При этом толкатель *6*, утапливая ловитель *1*, вводит втулку *7* в отверстие корпуса *2*, золотник *5* приподнимается вверх упором *8*, в результате чего холодная вода, проходя через распылительные отверстия толкателя *6*, охлаждает втулку *7* (она нагревается за счет передачи тепла от корпуса), обеспечивая быстрое «схватывание» деталей соединения.

7.3.3. Сборка клепаных и развальцованных соединений

Клепаные соединения. Их применяют в тех случаях, когда требуется неподвижно соединить детали из плохо свариваемых материалов и когда экономически нецелесообразно использовать резьбовые соединения. Наиболее широко клепаные соединения используют для деталей, выполненных из листовых материалов. Широко распространенные типы закле-

пок показаны на рис. 7.15. Материал заклепок – сталь, медь, латунь и алюминиевые сплавы.

Рис. 7.15. Широко распространенные типы заклепок

В соединяемых деталях отверстия часто сверлят заранее. Для обеспечения минимальной несоосности отверстий в соединяемых деталях их сверление необходимо выполнять в сборе (одновременно в двух деталях). Диаметральный зазор между стержнем заклепки и отверстием нужно выдерживать равным 0,2 мм (при диаметре стержня $d < 6$ мм), 0,25 мм (при $6 \le d < 10$ мм) и 0,3 мм (при $10 < d \le 18$ мм). При бóльших зазорах возможен изгиб стержня заклепки и взаимное смещение деталей, что приводит при эксплуатации к быстрому износу и разрушению соединения. Качество клепаного соединения зависит от длины заклепки. Выступающая часть стержня в зависимости от формы головки заклепки должна быть в пределах (1,3…1,6)*d*.

Клепку выполняют в горячем и холодном состояниях. Горячую клепку применяют при $d > 14$ мм. Клепку выполняют пневматическими клепальными молотками или с помощью прессов. Для заклепок с $d = 3\ldots12$ мм используют пневматические прессы, для заклепок с $d > 12$ мм применяют гидравлические и пневмогидравлические прессы.

Сборка клепаных соединений легко автоматизируется. Процесс автоматической клепки обычно состоит из следующих основных этапов: установки соединяемых деталей в сборочное приспособление, осуществляемой вручную или сборочным манипулятором; вставки заклепок в отверстия соединяемых деталей; осадки замыкающих головок заклепок с предварительным сжатием соединяемых деталей или без него; удаления собранного изделия в тару.

На рис. 7.16 приведена схема работы полуавтомата для одновременной вставки и расклепывания двух заклепок. После установки вручную деталей *1* и *2* на пальцы *3* через боковые отверстия А труб *6* подаются из вибробункеров в ориентированном состоянии заклепки *5*. Они направляются и удерживаются упругими губками *4*. Затем штоки *7* проталкивают заклепки *5* в отверстия соединяемых деталей *1* и *2*; при дальнейшем опускании штоков *7* происходит сжатие деталей *1* и *2* (в результате воздействия упругих опор *8*) и формирование плоских замыкающих головок заклепок при их контакте с плитой *9*. Для съема собранного изделия и ус-

тановки следующих деталей устройство полуавтомата, несущее штоки *7*, поднимается вверх.

Рис. 7.16. Схема работы полуавтомата для одновременной вставки (а) и расклепывания (б) двух заклепок

Рис. 7.17. Стадии работы клепального автомата

На рис. 7.17 показаны стадии работы клепального автомата, который пробивает отверстия в деталях, вставляет заклепки и осаживает их замыкающие головки [9]. Стадии работы автомата: *1* – соединяемые детали манипулятором устанавливаются на нижнее основание; *2* – верхний пуансон опускается и выдавливает в деталях углубление, а нижний боек поднимается и пробивает в деталях отверстия (высечки удаляются через боковое окно верхнего пуансона); *3* – верхний пуансон поднимается, а нижний боек остается в пробитом отверстии и препятствует сдвигу деталей; *4* – в верхней части автомата происходит смена позиции, заклепка автоматически подается в гнездо второго верхнего пуансона, в котором она удерживается раздвижными губками; *5* – второй верхний пуансон вводит заклепку в отверстия деталей, и нижний боек образует замыкающую головку заклепки.

Развальцованные соединения. Их получают за счет пластического расширения охватываемой или сжатия охватывающей детали.

На рис. 7.18 показаны некоторые примеры развальцованных соединений и способы их получения. Для прочного и герметичного соединения трубы с плитой (рис. 7.18, *а*) отверстие трубы раскатывают роликовой раскаткой. Для прочного соединения деталей применяют отбортовку (рис. 7.18, *б*) и завальцовку (рис. 7.18, *в*), которые выполняют роликовыми вальцовками, совершающими планетарное движение. Для прочного соединения тонкостенной втулки с корпусом отверстие втулки подвергают дорнованию (рис. 7.18, *г*).

Рис. 7.18. Развальцованные соединения и способы их получения

Развальцованные соединения характеризуются высокой технологичностью и находят все более широкое применение.

7.4. Образование погрешностей изделия при сборке

Основным выходным показателем процесса сборки является геометрическая точность изделия, характеризуемая точностью траектории движения подвижных частей изделия и относительного положения его деталей.

Основными причинами образования геометрических погрешностей изделия при сборке являются:

- погрешности размеров, формы и расположения поверхностей деталей, поступающих на сборку;
- собственные и контактные деформации деталей, возникающие в процессе сборки (собственные деформации обычно являются упругими, а контактные – упруго-пластическими).

При сборке соединяемые детали нагружаются распределенными и сосредоточенными силами и их моментами, подвергаясь растяжению, сжатию, изгибу и кручению. При этом силовые нагрузки на детали оказываются тесно взаимосвязанными с погрешностями их изготовления.

Рис. 7.19. Схема деформаций деталей редуктора при закреплении

На рис. 7.19 показана схема деформаций деталей редуктора при закреплении винтами на основании. Нижняя плоскость корпуса редуктора и верхняя плоскость основания имеют погрешности формы. Допустим, что точки *1* и *2* расположены одна за другой. При затяжке винта *4* редуктор опрокинется относительно точек *1* и *2* и соприкоснется с основанием

в точке 3. При затяжке винта 5 произойдет деформация корпуса и он коснется основания в точке 6. При закреплении деформируются также боковые стенки корпуса, что может нарушить положение подшипников и привести к защемлению вала. Деформируются и винты, что может нарушить их нормальную работу.

На рис. 7.20 даны схемы образования погрешностей при сборке резьбовых соединений. При наличии отклонения от перпендикулярности оси резьбового отверстия в корпусе относительно его плоскости (вспомогательная база) шпилька при затяжке гайки изгибается (рис. 7.20, *а*), изгиб шпильки (рис. 7.20, *б*) происходит и при отклонении от параллельности верхней плоскости присоединяемой к корпусу детали относительно ее нижней плоскости (основная база).

а *б*

Рис. 7.20. Погрешности, возникающие при сборке резьбовых соединений

Изгибу подвергаются валы, имеющие резьбовые ступени, если, например, торец гайки имеет отклонение от перпендикулярности относительно оси ее резьбы. Изгиб валов вызывает перекос колец подшипников, нарушает их нормальную работу и приводит к неравномерности вращения.

Выше при рассмотрении прессовых соединений полагали распределение контактного давления равномерным. В действительности из-за погрешностей формы, например отверстия втулки и соединяемой с ним ступени вала, это распределение будет неравномерным по поверхности контакта, что, в частности, может вызвать перекос втулки относительно вала. Такая же погрешность может сформироваться при напрессовке втулки на вал и при незначительных погрешностях формы сопрягаемых поверхностей, если, например, усилие запрессовки будет приложено ко втулке внецентренно.

При сборке прессовых соединений, как отмечалось выше, происходит увеличение диаметра наружной поверхности охватывающей детали и уменьшение диаметра отверстия охватываемой. При этом на указанные

поверхности в трансформированном виде переносятся погрешности формы сопрягаемых поверхностей. Сказанное подтверждает следующий пример (рис. 7.21). На вал, имеющий в диаметральном сечении форму шестигранника с отклонением от круглости 5…7 мкм (рис. 7.21, *а*), напрессовывали с натягом $N = 29…31$ мкм кольцо конического подшипника. Отклонения от круглости отверстия и дорожки качения кольца были близкими к нулю (рис. 7.21, *б*). После напрессовки кольца дорожка качения также приобрела форму шестигранника. Причем у узкого торца кольца отклонение от круглости составило 4 мкм, а у широкого – 2…3 мкм (рис. 7.21, *в*). Аналогичные явления происходят и при запрессовке наружного кольца подшипника в корпус.

Рис. 7.21. Влияние погрешности формы вала на погрешности формы дорожки качения напрессованного на него кольца конического подшипника: а – круглограмма вала; б – круглограммы отверстия и дорожки качения кольца до сборки; в – круглограммы дорожки качения кольца после сборки

Существенные упругие деформации относительно нежестких деталей могут происходить и под действием веса присоединяемых к ним деталей. Это имеет место, в частности, при установке на станину станка суппортов, столов и т. п., под действием веса которых направляющие станины прогибаются. Чтобы компенсировать этот прогиб, поступают следующим образом. Перед шлифованием направляющих станины последнюю деформируют с помощью винта (рис. 7.22) так, чтобы направляющие оказались вогнутыми (величину прогиба обычно определяют экспериментально). После шлифования и освобождения станины от воз-

действия винта направляющие становятся выпуклыми, а после установки на станину стола или суппорта направляющие выпрямляются.

Рис. 7.22. Схема деформации станины перед шлифованием направляющих

Рассмотренные примеры показывают, что для снижения погрешностей изделий при сборке необходимо: повышать точность деталей; в ряде случаев использовать детали с преднамеренным искажением формы; оптимизировать сами процессы сборки. Например, при сборке многоболтовых соединений, как указывалось выше, необходимо соблюдать определенную последовательность затяжки гаек; для повышения точности сборки прессовых соединений целесообразно вместо запрессовки использовать сборку с термовоздействием на детали. Значительно повысить точность сборки можно за счет изменения конструкции изделия.

7.5. Контроль качества сборки. Испытание собранных изделий

Качество изделий в сборочных цехах контролируют рабочие-сборщики, мастера участков и контролеры. При общей и узловой сборке проверяют:

- наличие необходимых деталей в собранных соединениях (выполняют осмотром);
- правильность положения соединенных деталей и узлов (оценивают осмотром);
- зазоры в собранных соединениях (определяют с помощью щупов);
- точность расположения соединенных деталей (выполняют в специальных приспособлениях);
- герметичность соединений (в специальных приспособлениях) и плотность прилегания поверхностей деталей (на краску);
- затяжку резьбовых соединений, плотность постановки заклепок, плотность развальцованных и других соединений;
- размеры, заданные в сборочных чертежах;

- выполнение специальных требований (по уравновешенности узлов вращения, подгонке по массе и статическому моменту);
- обеспечение заданных параметров собранных изделий и их составных частей (производительности и напору насосов, точности делительных механизмов, качества контактов в электрических машинах и др.);
- внешний вид собранных изделий (отсутствие поврежденных деталей, загрязнений и других дефектов).

Объекты, методы и средства контроля устанавливает технолог. Он выбирает схемы контроля и разрабатывает технические задания на разработку конструкций контрольно-измерительных инструментов и приспособлений.

В качестве примера на рис. 7.23 приведены схемы контроля некоторых параметров точности изделий [6], выполняемого с помощью индикаторов часового типа.

Радиальное биение цилиндрической поверхности вращающейся детали измеряют по схеме, приведенной на рис. 7.23, *а*.

Осевое перемещение вращающейся детали определяют как разность показаний индикатора, расположенного точно по ее оси (рис. 7.23, *б*).

Торцовое биение вращающейся детали проверяют по схеме, изображенной на рис. 7.23, *в*.

Отклонение от соосности цилиндрических поверхностей двух неподвижных деталей контролируют индикатором, установленным на одной из них с помощью вращающейся муфты (рис. 7.23, *г*).

Отклонение от соосности цилиндрической поверхности одной вращающейся детали относительно другой неподвижной детали проверяют по схеме, указанной на рис. 7.23, *д*.

Отклонение от прямолинейности перемещения узла в заданном направлении измеряют с помощью индикатора и эталона в виде линейки или оправки (рис. 7.23, *е*).

Отклонение от перпендикулярности (параллельности) перемещения узла к заданному направлению проверяют индикатором по эталону, предварительно выставленному в заданном направлении (рис. 7.23, *ж*).

Отклонение от перпендикулярности оси вращения детали относительно плоскости контролируют индикатором по схеме, приведенной на рис. 7.23, *з*.

Заключительной контрольной операцией является испытание изделий. Их испытывают в условиях, приближенных к эксплуатационным. Все виды испытаний делят на приемочные, контрольные и специальные.

При приемочных испытаниях определяют фактические эксплуатационные характеристики машины (точность, жесткость, мощность, производительность, затраты энергии и др.).

Рис. 7.23. Контроль точности различных параметров машины

Если у изделия обнаруживают дефекты, то после их устранения проводят контрольные испытания.

Специальные испытания выполняют для изучения износа деталей, установления пригодности новых марок материалов для ответственных деталей и изучения других явлений в машинах.

7.6. Основы разработки технологического процесса сборки изделия

Технологический процесс сборки изделия разрабатывают в первую очередь до разработки технологических процессов изготовления детали. Такая последовательность объясняется тем, что при проектировании технологии сборки изделия могут вноситься изменения в конструкции деталей и предъявляемые к ним технические требования, например, по точности.

7.6.1. Исходные данные и последовательность разработки технологического процесса сборки изделия

Исходную информацию, необходимую для разработки технологического процесса сборки изделия, делят на базовую, справочную и руководящую.

При разработке технологического процесса для новых предприятий и производств базовыми исходными данными являются: сборочные чертежи изделия и узлов, спецификации деталей, технические условия сборки и испытания изделия, рабочие чертежи деталей, входящих в изделие, годовой объем выпуска изделий. Сборочный чертеж должен содержать необходимые проекции и разрезы, размеры, выдерживаемые при сборке, посадки в сопряжениях, данные о массе изделия и его составных частей. В технических условиях указывают точность сборки, качество сопряжений, их герметичность, жесткость стыков, моменты затяжки резьбовых соединений, точность балансировки вращающихся частей, указания о методах выполнения соединений и методах контроля изделий.

При разработке технологического процесса для действующих предприятий необходимо также располагать сведениями об имеющихся в сборочном производстве средствах технологического оснащения, производственных площадях и других производственных условиях.

К справочной информации относят каталоги и справочники по сборочному оборудованию и технологической оснастке, нормативы времени на слесарно-сборочные работы и др.

Руководящей информацией являются данные о перспективных технологических процессах в отрасли, стандарты на техническую документацию, основные требования по перспективам развития производства на предприятии.

Технологический процесс сборки изделия разрабатывают в определенной последовательности.

1. Определяется тип производства и устанавливается соответствующая ему организационная форма сборки. Определение типа производства

выполняется так же, как при изготовлении деталей. Среднее штучное время на операциях технологического процесса сборки принимают по технологическому процессу сборки аналогичного изделия или рассчитывают по укрупненным нормативам на различные комплексы сборочных работ.

2. Осуществляют технологический контроль сборочных чертежей изделия и его узлов на предмет соответствия их конструкций требованиям технологичности при сборке для условий данного предприятия.

3. Устанавливают последовательность соединений всех узлов и деталей изделия, составляют схемы общей и узловой сборки. При этом учитывают, что на общую сборку должно подаваться возможно большее число предварительно собранных узлов и возможно меньшее – отдельных деталей; общая сборка должна быть в максимальной степени освобождена от выполнения мелких сборочных соединений и различных вспомогательных работ.

4. Устанавливают наиболее эффективные способы соединения деталей, проверки положений и фиксации всех составляющих изделие узлов и деталей. Формируют структуру и содержание технологических операций сборки и определяют методы контроля и испытания изделия.

5. Разрабатывают необходимую для выполнения технологического процесса нестандартную технологическую оснастку.

6. Производят технологическое нормирование сборочных работ и определяют технико-экономические показатели технологического процесса сборки.

7. Оформляют технологическую документацию.

7.6.2. Технологический контроль сборочных чертежей

Указанный контроль выполняют для оценки соответствия конструкции изделия требованиям технологичности при сборке. Эти требования могут быть сформулированы следующим образом.

Прежде всего, конструкция машины должна допускать ее сборку из предварительно собранных узлов. Это позволяет осуществлять параллельную сборку узлов и общую сборку, что сокращает длительность цикла сборки машины. Значительное преимущество обеспечивается в случае, если узел является агрегатом, который перед подачей на общую сборку проходит контроль и испытание; этим устраняется появление дефектов на общей сборке и повышается качество изделий.

Машина в целом должна иметь простую компоновку, не вызывающую затруднений при сборке. Следует по возможности уменьшать количество наименований деталей и узлов машины, а также стремиться к их

взаимозаменяемости. Использование стандартных деталей и узлов (агрегатов) позволяет приобретать их со стороны по сравнительно низкой цене. Сокращение номенклатуры винтов и болтов дает возможность наиболее эффективно использовать при сборке резьбовых соединений механизированные инструменты.

Сокращение числа деталей в изделии достигается путем объединения в одной детали функций нескольких. Например, винт с буртом (рис. 7.24, *а*) выполняет функции винта и шайбы. При изготовлении винта из капрона обеспечивается уплотнение соединения. Отгибанием края бурта винта (рис. 7.24, *б*) и выполнением у гайки конической опорной поверхности (рис. 7.24, *в*) достигается их стопорение.

Конструкция машины должна обеспечивать возможность удобного и свободного подвода высокопроизводительных механизированных инструментов к местам соединения деталей, легкость их захвата грузоподъемными устройствами для транспортировки и установки на собираемое изделие.

Рис. 7.24. Примеры технологичных конструкций деталей и соединений

Сборка машины должна производиться без применения сложных приспособлений, предпочтительно без поворота базовой детали (с которой начинается сборка), путем осуществления простых движений для установки соединяемых деталей, подвода и отвода сборочных инструментов. Базовая деталь должна быть достаточно жесткой и иметь надежные технологические базы, позволяющие обеспечить высокую точность ее

установки. Следует сокращать при сборке совместную механическую обработку деталей, а также пригоночные работы.

Кроме перечисленных общих требований, нужно учитывать частные условия сборки различных соединений. При сборке соединений с зазором или натягом детали должны иметь заходные фаски (рис. 7.24, *г*), а также направляющие пояски А (рис. 7.24, *д*) для устранения перекоса. При запрессовке пальца в отверстие вилки (рис. 7.24, *е*) во избежание задиров соединяемые поверхности этих деталей нужно выполнять ступенчатыми, причем ширина пояска А в вилке должна быть больше ширины ее пояска Б ($b_1 > b_2$).

Винты и гайки для повышения производительности сборки следует завинчивать и затягивать торцовыми ключами. Для этого должно быть предусмотрено достаточно большое расстояние от винта (гайки) до стенки корпусной детали (рис. 7.24, *ж*). В многоболтовом (винтовом, шпилечном) соединении расстояние между осями резьбовых деталей должно быть достаточным для применения многошпиндельных завертывающих устройств. Гайки, расположенные на внутренней поверхности деталей, для надежного стопорения следует шплинтовать; гайки, расположенные на наружной поверхности, можно устанавливать с пружинными шайбами, что упрощает сборку.

При автоматической сборке к конструкции изделия предъявляются дополнительные требования. Детали должны иметь простые симметричные формы, что упрощает задачу их ориентации при выдаче из бункерно-ориентирующих устройств на рабочую позицию сборочного автомата. Конструкция деталей должна быть такой, чтобы при выдаче из бункерных устройств не происходило их взаимного сцепления. Следует максимально широко использовать стандартные или нормализированные детали для большего применения однотипных сборочных устройств. Целесообразно заменять разъемные соединения неразъемными, применяя клепку, развальцовку и т. п. Сборка должна вестись при простых (преимущественно прямолинейных) движениях исполнительных устройств автомата без поворота изделия. Для повышения надежности работы сборочных автоматов в ряде случаев целесообразно повышать точность деталей.

Важным этапом технологического контроля является размерный анализ конструкции изделия. Выбор методов обеспечения требуемой точности замыкающих звеньев конструкторских размерных цепей, расчет допусков и предельных отклонений их составляющих звеньев производит конструктор. Технолог проверяет принятые им решения. Такая проверка сводится к анализу обоснованности принятых методов достижения точности замыкающих звеньев конструкторских размерных цепей узлов и изделия в целом и решению обратных задач для этих цепей.

На основе технологического контроля сборочных чертежей и чертежей деталей составляется перечень замечаний и предложений по изменению конструкции изделия и параметров точности деталей, которые согласуются с конструктором. Последний после анализа этих замечаний и предложений может внести изменения в конструкцию изделия, обеспечивающие повышение его технологичности при сборке.

7.6.3. Разработка последовательности сборки изделия. Проектирование сборочных операций

Последовательность сборки определяется конструкцией изделия и принятыми методами обеспечения точности замыкающих звеньев размерных цепей.

Общую сборку начинают с установки базовой детали, в качестве которой обычно используется рама, станина, основание и т. п. Базовую деталь ставят в положение, удобное для сборки. Если эта деталь не достаточно жесткая, то ее устанавливают (часто с выверкой) в жесткое приспособление и при подвижной сборке перемещают вместе с этим приспособлением. С установки базовой детали начинают сборку любого узла. После установки базовой детали на нее последовательно монтируют все детали и узлы.

При разработке последовательности сборки нужно придерживаться следующих общих рекомендаций.

1. Последовательность установки деталей должна быть такой, чтобы ранее смонтированные детали не мешали установке следующих.

2. Необходимо стремиться к тому, чтобы в процессе сборки машины были минимальны частичные разборки ранее собранных узлов.

3. Трудоемкость сборки большинства узлов должна быть примерно одинакова.

4. При обеспечении точности замыкающих звеньев размерных цепей методом пригонки пригоночные работы нужно выполнять вне собираемого изделия.

Последовательность сборки очень удобно представлять в виде схем (рис. 7.25), которые разрабатываются на основе сборочных чертежей изделия. Сначала разрабатывают схему общей сборки (рис. 7.25, *а*), а затем – схемы узловой сборки (рис. 7.25, *б*). Детали и узлы на схемах сборки изображают в виде прямоугольников. Для обозначения детали в прямоугольнике указывают ее наименование, номер позиции и количество.

Узел обозначают по базовой детали, с которой начинают его сборку, добавляя перед номером позиции этой детали индекс «Сб.». Схемы сборки могут содержать надписи, поясняющие характер сборочных работ (рис. 7.25, *б*).

Рис. 7.25. Схемы сборки: а – общей; б – узловой

Схемы сборки являются документом, по которому работники сборочного цеха знакомятся с последовательностью сборки изделия и содержанием сборочных работ, организуют процесс сборки, ведут комплектование деталей и узлов и их подачу в определенной последовательности к местам сборки.

На основе схем сборки разрабатывают технологический процесс сборки. Производят формирование операций, выбирают или проектируют и изготавливают средства технологического оснащения сборки, определяют нормы времени на выполнение сборочных операций.

Нормирование сборочных работ производится с использованием нормативов времени на слесарно-сборочные работы, которые содержат нормы оперативного времени выполнения наиболее распространенных сборочных переходов.

Содержание сборочных операций зависит от типа производства и соответствующей ему организационной формы сборки.

При непоточной стационарной сборке стремятся к тому, чтобы операция включала комплекс переходов, выполнение которых можно возложить на рабочего или бригаду рабочих, специализирующихся на выполнении данного вида работ. Часто операцию составляет сборка какого-либо узла.

При непоточной подвижной, поточной стационарной и подвижной сборках длительность операций должна быть равной или кратной такту выпуска изделий. Если длительность операции в целое число раз превышает такт выпуска, то ее нужно выполнять в несколько потоков. Синхронизация сборочных операций при поточной сборке может быть достигнута путем изменения их содержания, изыскания более производительных методов сборки, использования более производительного оборудования и технологической оснастки, а также изменения режимов работы оборудования.

На рис. 7.26 в качестве примера приведен эскиз узла (ступицы); на рис. 7.27 дана схема его сборки. Процесс сборки начинают со сборки шкива (Сб. 8). Этот процесс заключается в последовательной установке внутрь шкива *8* уплотнительного кольца *10*, первого подшипника *7*, втулки *9* и второго подшипника *7*. После этого шкив (Сб. 8) напрессовывают на ступицу *11* и устанавливают стопорное кольцо *3*. Далее собирают фланец (Сб. 5), при этом устанавливают на фланец *5* крышку *1*, закрепляют ее винтами *2* и ставят прокладку *6*. Затем собранный фланец (СБ. 5) привертывают винтами *4* к частично собранной ступице и получают собранный узел (Сб. 11).

Рис. 7.26. Эскиз узла (ступицы)

Рис. 7.27. Схема сборки ступицы

Наименование и содержание операций технологического процесса сборки ступицы представлено в табл. 7.2.

Таблица 7.2

Технологический процесс сборки ступицы

№ операции	Наименование операции	Содержание операции (последовательность переходов)
005	Сборка шкива (Сб. 8)	1. Закрепить шкив *8* в приспособлении. 2. Установить кольцо *10*. 3. Смазать и установить подшипник *7*. 4. Протереть и установить втулку *9*. 5. Смазать и установить подшипник *7*
010	Установка шкива (Сб. 8)	1. Закрепить ступицу *11* в приспособлении. 2. Установить шкив (Сб. 8) на ступицу *11*. 3. Установить кольцо стопорное *3*
015	Сборка фланца (Сб. 5)	1. Закрепить фланец *5* в приспособлении. 2. Установить крышку *1*. 3. Закрепить крышку винтами *2*. 4. Установить прокладку *6*
020	Установка фланца (Сб. 5)	1. Установить фланец (Сб. *5*). 2. Закрепить фланец (Сб. *5*) винтами *4*
025	Контрольная	1. Проверить легкость вращения шкива *8*. 2. Проверить биение поверхности Б относительно поверхности А

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Как классифицируются процессы сборки по стадиям выполнения и уровню механизации и автоматизации?
2. Назовите основные организационные формы сборки и дайте их характеристику.
3. Назовите достоинства резьбовых соединений.
4. Как обеспечивается затяжка резьбовых соединений?
5. Как обеспечивается неподвижность шпилек в корпусе?
6. Как производится сборка поперечно-прессовых соединений?
7. Каковы преимущества поперечно-прессовых соединений перед продольно-прессовыми?
8. В чем состоит сущность гидропрессовой сборки-разборки?
9. Каковы достоинства клепаных и развальцованных соединений?
10. Каковы пути повышения геометрической точности изделий при сборке?

11. Какие виды испытаний проходит собранное изделие?

12. Какова последовательность разработки технологического процесса сборки изделия?

13. Что включает в себя технологический контроль сборочных чертежей?

14. Каким требованиям должна удовлетворять конструкция изделия для обеспечения технологичности при сборке?

15. Как строится схема сборки изделия?

16. Как определяется содержание сборочных операций?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Базирование и базы в машиностроении. Термины и определения. ГОСТ 21495-76. – М.: Изд-во стандартов, 1990. – 35 с.

2. Базров Б.М. Основы технологии машиностроения: учебник для вузов. – М.: Машиностроение, 2005. – 736 с.

3. Балакшин Б.С. Основы технологии машиностроения. – М.: Машиностроение, 1969. – 559 с.

4. Замятин В.К. Технология и автоматизация сборки: учебник для машиностроительных специальностей вузов. – М.: Машиностроение, 1993. – 464 с.

5. Иващенко И.А. Технологические размерные расчеты и способы их автоматизации. – М.: Машиностроение, 1975. – 222 с.

6. Колесов И.М. Основы технологии машиностроения: учебник для машиностроительных специальностей вузов. – М.: Высшая школа, 1999. – 591 с.

7. Маталин А.А. Технология машиностроения: учебник. – СПб.: Издательство «Лань», 2010. – 512 с.

8. Обработка металлов резанием: справочник технолога / А.А. Панов, В.В. Аникин, Н.Г. Бойм и др.; под общ. ред. А.А. Панова. – М.: Машиностроение, 2004. – 784 с.

9. Основы технологии машиностроения: учебник для вузов / под ред. В.С. Корсакова. – М.: Машиностроение, 1977. – 416 с.

10. Размерный анализ технологических процессов / В.В. Матвеев, М.М. Тверской, Ф.И. Бойков и др. – М.: Машиностроение, 1982. – 264 с.

11. Суслов А.Г. Технология машиностроения: учебник для студентов машиностроительных специальностей вузов. – М.: Машиностроение, 2004. – 400 с.

12. Суслов А.Г., Дальский А.М. Научные основы технологии машиностроения. – М.: Машиностроение, 2002. – 684 с.

13. Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х т. Т. 1 / под ред. А.М. Дальского, А.Г. Косиловой, Р.К. Мещерякова, А.Г. Суслова. – М.: Машиностроение-1, 2003. – 912 с.

14. Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х т. Т. 2 / под ред. А.М. Дальского, А.Г. Суслова, А.Г. Косиловой, Р.К. Мещерякова. – М.: Машиностроение-1, 2003. – 944 с.

15. Технология машиностроения. В 2 т. Т. 1. Основы технологии машиностроения: учебник для вузов / В.М. Бурцев, А.С. Васильев, А.М. Дальский и др.; под ред. А.М. Дальского. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1997. – 564 с.

16. Технология машиностроения. В 2 кн. Кн. 1. Основы технологии машиностроения: учебное пособие для вузов / Э.Л. Жуков, И.И. Козырь, С.Л. Мурашкин и др.; под ред. С.Л. Мурашкина. – М.: Высшая школа, 2003. – 278 с.

17. Цепи размерные. Основные понятия, методы расчета линейных и угловых цепей: методические указания РД 50-635-87 / И.М. Колесов, Е.И. Луцков, А.И. Кубарев и др. – М.: Изд-во стандартов, 1987. – 45 с.

Учебное издание

СКВОРЦОВ Владимир Фёдорович

ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИИ МАШИНОСТРОЕНИЯ

Учебное пособие

Научный редактор
кандидат технических наук, доцент А.Ю. Арляпов

Выпускающий редактор *Д.В. Заремба*
Редактор *В.Ю. Пановица*
Компьютерная верстка *В.Ф. Скворцов*, *В.П. Аршинова*
Дизайн обложки *Т.А. Фатеева*

Подписано к печати 01.07.2013. Формат 60x84/16. Бумага «Снегурочка».
Печать XEROX. Усл. печ. л. 18,03. Уч.-изд. л. 16,31.
Заказ 747-13. Тираж 100 экз.

ИЗДАТЕЛЬСТВО ТПУ. 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30
Тел./факс: 8(3822)56-35-35, www.tpu.ru