

Е. И. МАХАРИНСКИЙ
В. А. ГОРОХОВ

ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИИ МАШИНОСТРОЕНИЯ

Утверждено
Министерством образования и науки
Республики Беларусь
в качестве учебника для студентов
машиностроительных специальностей
высших учебных заведений

МИНСК
"ВЫШЭЙШАЯ ШКОЛА"
1997

ББК 34 5я73
М36
УДК 621 (075 8)

Рецензенты кафедры технологии машиностроения Могилевского машиностроительного института, акад Академии наук Беларуси, д-р техн наук, проф П И Ящерицын

Махаринский Е. И., Горохов В. А.

М 36 Основы технологии машиностроения: Учебник. — Мн.: Выш. шк., 1997. — 423 с.: ил.

ISBN 985-06-0120-5.

Изложены теоретические понятия, структурные элементы и методика проектирования технологических процессов изготовления деталей, сборки машин, их контроля и испытания, пути обеспечения качества и снижения себестоимости изделий машиностроения

Для студентов машиностроительных специальностей вузов Может использоваться учащимися техникумов, колледжей, технических училищ, ИТР предприятий, слушателями системы повышения квалификации машиностроительного профиля

М $\frac{6210000000 - 015}{M304(03) - 97}$ 37—97

ББК 34.5я73

ISBN 985-06-0120-5

© Е. И. Махаринский,
В. А. Горохов, 1997

У-2238

ПРЕДИСЛОВИЕ

Технология машиностроительного и приборостроительного производства в значительной степени определяет его состояние и развитие. От ее уровня зависят эффективность труда, расходование материальных и энергетических ресурсов, качество продукции. Важную роль в развитии этих отраслей производства играет подготовка (и переподготовка) квалифицированных инженерных кадров, освоение ими современных методов проектирования и совершенствования технологических процессов изготовления машин и приборов, готовность к системному анализу быстро и непредсказуемо изменяющейся производственной и рыночной ситуации, к поиску нетрадиционных решений.

В 1950—70-х гг. изданы учебники и учебные пособия по технологии машиностроения А. П. Соколовского, А. И. Каширина, Б. С. Балакшина, В. М. Кована, А. А. Маталина, А. Н. Гаврилова, П. И. Ящерицына, В. В. Бабука и др. Они были актуальны и соответствовали своему назначению в свое время. Но в связи с изменившимися условиями, развитием и достижениями технологической науки и практики, появлением новых способов обработки, автоматизацией проектирования технологических процессов и оснастки возникла необходимость в издании нового учебника, отражающего указанные изменения. Кроме того, претерпели серьезные изменения программы курсов по технологии машиностроения, в вузах готовят специалистов по новым машиностроительным специальностям, для которых читается один и тот же теоретический курс «Основы технологии машиностроения». Вообще, целесообразно осуществлять издание отдельных учебных пособий для каждой из машиностроительных и приборостроительных специальностей. Поэтому и с этих позиций налицо актуальность создания единого учебника универсального назначения с охватом учебного материала, необходимого всем специальностям машиностроительного и приборостроительного профилей.

В качестве базы учебника принята программа курса «Основы технологии машиностроения» наиболее массовых и широко пред-

В 1950—80-х гг. проведены многочисленные исследования по адаптивному управлению станками, по групповой обработке, технологической наследственности, влиянию различных факторов на точность обработки, качество поверхности и состояние подповерхностного слоя материала, регуляризации микрогеометрии технических поверхностей, технологическому обеспечению эксплуатационных свойств деталей и их соединений, повышению функциональных характеристик машин и приборов, созданию новых методов и способов обработки, включая комбинированные и совмещенные процессы воздействия на материалы. В разработке этих проблем, кроме названных выше ученых, принимали участие Э. А. Сатель, Ф. С. Демьянюк, А. Н. Гаврилов, М. Е. Егоров, В. С. Корсаков, Е. Г. Коновалов, А. М. Дальский, П. Е. Дьяченко, Ю. Г. Шнейдер, А. А. Маталин, А. А. Зыков, В. Н. Чачин, И. М. Колесов и многие другие российские и белорусские ученые.

Современный уровень технологии машиностроения позволяет изменить взгляд на нее как на науку второго порядка после таких классических прикладных наук, как, например, теория механизмов и машин, сопротивление материалов и т. д., обслуживающих конструирование. В настоящее время технологию машиностроения можно трактовать как науку по материализации конструкторских идей, которая должна не только гарантировать заданное качество и эффективность изготовления машин, но и приводить технологическими путями к улучшению их эксплуатационных свойств и повышению ресурса работы в усложненных условиях эксплуатации.

ОСНОВНЫЕ УСЛОВНЫЕ СОКРАЩЕНИЯ

АдСУ — адаптивная система управления	КК — комплекточная карта
АСПР — автоматическая система программного регулирования	ККИ — карта кодирования информации
АСР — автоматическая система регулирования	КНИ — карта наладки инструмента
АСС — автоматическая система стабилизации	КТП — карта технологического процесса
АСУ — автоматизированная система управления	КЭ — карта эскизов
АСУМ — многопараметрическая АСУ	ЛВМ — литье по выплавляемым моделям
АСУО — однопараметрическая АСУ	ЛК — литье в кокиль
АЦП — аналого-цифровой преобразователь	ЛОФ — литье в оболочковые формы
БПС — беспойсковые системы	ЛПД — литье под давлением
ВО — ведомость оснастки	ЛПФ — литье в песчаные формы
ГИ — генератор импульсов	МК — маршрутная карта
ГКМ — горизонтально-ковочная машина	МП — машиностроительное предприятие
ГОСТ — государственный стандарт	МТПП — подсистема материально-технологической подготовки производства
ГрАЛП — граничный алгоритм управления съемом припуска по каналу подачи	МФ — машинная формовка
ДП — датчик припуска	НСП — неразборные специальные приспособления
ЕСТД — Единая система технологической документации	ОБ — подсистема обработки заготовок
ЗГ — подсистема изготовления заготовок	ОК — операционная карта
ЗУ — задающее устройство	ОПД — опережающее пластическое деформирование
ЗпУ — запоминающее устройство	ОСТ — отраслевой стандарт
ИП — измерительный преобразователь	ПАК — прибор активного контроля
ИПМ — измерительный преобразователь мощности	ПМО — плазменно-механическая обработка
ИСУ — исполнительное устройство	ППД — поверхностное пластическое деформирование
ИТПП — подсистема информативно-технологической подготовки производства	ПС — поисковая система
ИУ — измерительное устройство	ПУ — пульта управления
	РТК — расчетно-технологическая карта
	РУ — ручное управление
	РФ — ручная формовка

СБ — подсистема сборки машин
СКЛ — подсистема складирования
СЛУ — счетно-логическое устройство
СНП — специализированные наладочные приспособления
СНС — самонастраивающаяся система
СОЖ — смазочно-охлаждающая жидкость
СПС — самоприспосабливающаяся система
СРП — сборно-разборные приспособления
СтАЛП — ступенчатый алгоритм управления съемом припуска по каналу подачи
СТП — стандарт предприятия
СУ — устройство сравнения

СЭР — система экстремального регулирования
ТП — технологический процесс
ТС — технологическая система
ТТ — технические требования
ТУ — технические условия
УБП — универсально-безналадочные приспособления
УН — установка нуля
УП — управляющая программа
УПР — подсистема управления
УСП — универсально-сборные приспособления
УЧПУ — устройство ЧПУ
ЧПУ — числовое программное управление
ЦЛ — центробежное литье
ЭХРО — электрохимическая размерная обработка

ВВЕДЕНИЕ

Изучение технологических процессов изготовления машин, орудий труда и вооружения в учебных заведениях России началось в XIX в. В 1804 г. акад. В. М. Севергин сформулировал основы технологии в работе «Технология — наука о ремеслах и заводах». В 1818 г. проф. Московского университета И. А. Двигубский издал книгу «Начальные основания технологии как краткое описание работ, на фабриках и заводах производимых». Одним из капитальных пособий по технологии металлообработки являлся трехтомный труд проф. И. А. Тиме «Основы машиностроения. Организация машиностроительных фабрик в техническом и экономическом отношении и производство в них работ», вышедший в 1885 г. Американец Ф. У. Тейлор в 1900 г. в работе «Искусство обработки металлов» определил ряд важных положений в технологии механической обработки резанием.

Технология машиностроения как наука об изготовлении машин требуемого качества, в нужном количестве и в заданные сроки при наименьших затратах живого и овеществленного труда (наименьшей себестоимости изделий) получила свое становление и развитие в советское время.

К первым трудам по технологии машиностроения относятся работы проф. А. П. Соколовского (1930—1932 гг.), который сказал, что как наука технология родилась в цехе и никогда не должна порывать с ним связи. Обобщением опыта автотракторной промышленности были работы «Основы проектирования технологических процессов» проф. А. И. Каширина (1933 г.) и «Технология автотракторостроения» проф. В. М. Кована (1935 г.). Лауреат Ленинской премии проф. Б. С. Балакшин в 40-х гг. разработал теорию размерных цепей, применение которой обеспечило повышение точности изготовления машин. Большое значение для развития теоретических основ технологии машиностроения имели работы Н. А. Бородачева по анализу качества машин, К. В. Вотинава по влиянию жесткости технологических систем на точность обработки, Г. А. Шаумяна по теории производительности обработки на автоматах.

В 1950—80-х гг. проведены многочисленные исследования по адаптивному управлению станками, по групповой обработке, технологической наследственности, влиянию различных факторов на точность обработки, качество поверхности и состояние подповерхностного слоя материала, регуляризации микрогеометрии технических поверхностей, технологическому обеспечению эксплуатационных свойств деталей и их соединений, повышению функциональных характеристик машин и приборов, созданию новых методов и способов обработки, включая комбинированные и совмещенные процессы воздействия на материалы. В разработке этих проблем, кроме названных выше ученых, принимали участие Э. А. Сатель, Ф. С. Демьянюк, А. Н. Гаврилов, М. Е. Егоров, В. С. Корсаков, Е. Г. Коновалов, А. М. Дальский, П. Е. Дьяченко, Ю. Г. Шнейдер, А. А. Маталин, А. А. Зыков, В. Н. Чачин, И. М. Колесов и многие другие российские и белорусские ученые.

Современный уровень технологии машиностроения позволяет изменить взгляд на нее как на науку второго порядка после таких классических прикладных наук, как, например, теория механизмов и машин, сопротивление материалов и т. д., обслуживающих конструирование. В настоящее время технологию машиностроения можно трактовать как науку по материализации конструкторских идей, которая должна не только гарантировать заданное качество и эффективность изготовления машин, но и приводить технологическими путями к улучшению их эксплуатационных свойств и повышению ресурса работы в усложненных условиях эксплуатации.

1 ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ, ЦЕЛИ И ФУНКЦИИ КУРСА

1.1. Системный характер машиностроительного производства

Основное звено машиностроительной отрасли — *машиностроительное предприятие* — является сложной человеко-машинной системой. Вообще, анализируемый объект или процесс можно выделить из окружающей среды как систему, если: 1) он есть целостная совокупность частей (подсистем, компонентов, элементов), между которыми имеются существенные устойчивые отношения, с закономерной необходимостью обуславливающие его свойства как целого; 2) он определенным образом организован, т. е. его существенные отношения и компоненты упорядочены во времени и в пространстве; 3) существуют свойства объекта (или процесса), которые присущи ему как целому и не свойственны ни одному из его компонентов в отдельности.

Элементом системы будем называть предел ее членения на части с точки зрения конкретной решаемой задачи. Термин «подсистема» подчеркивает, что такая часть рассматриваемой системы должна обладать всеми указанными выше признаками системы. *Компонент* — это термин, объединяющий понятия «подсистема» и «элемент».

Окружающая среда — реально существующее (ближайшее) окружение (другие системы), имеющее с рассматриваемой системой определенные отношения. Свойства системы проявляются через ее отношения с окружающей средой и характеризуют ее как нечто целое, не расчлененное на части.

Отношением следует называть взаимозависимость или взаимосвязь элементов системы. В любой машине существуют *пространственные отношения* между ее элементами (расстояние, параллельность, перпендикулярность, соосность и т. д.). В каждом процессе существуют *временные отношения* между элементами, т. е. отношения порядка следования элементов процесса во времени. В любой технической системе имеются *причинно-следственные от-*

ношения, т. е. любая реакция или действие системы имеет свою причину. Частным случаем отношения является *связь* — физический канал, по которому обеспечивается обмен между элементами системы (а также между системой и окружающей средой), материалами, энергией и (или) информацией.

К основным характеристикам систем относятся связи с окружающей средой, функции, структура, функционально-структурные свойства и эволюция. Приведенные характеристики являются системными и определяют наиболее существенные черты строения и функционирования сложных объектов и процессов.

Среди различных типов связей системных объектов с окружающей средой выделяются входные и выходные воздействия, которые во многом определяют их функции.

В широком смысле *функцию* определяют как способность системы к целесообразной деятельности в рамках более сложной системы, в состав которой она входит. Целесообразная деятельность характеризуется совокупностью таких реакций системы на изменения, происходящие во внешней среде и внутри системы, которые делают ее функционирование направленным на достижение поставленной цели. В более узком смысле функцией технической системы является определенное действие (D), производимое ею для преобразования некоторого начального или исходного объекта (N) в желательный конечный результат (R) при определенных ограничениях (H). Символьная запись, описывающая функцию системы F , имеет вид

$$F = \langle D, N \rightarrow R, H \rangle. \quad (1.1)$$

Компонент H при описании условий и ограничений. при которых

могут изменяться лишь в сторону увеличения или уменьшения этой интенсивности (например, масса, габариты, производительность, стоимость и т. д.). Ко второй группе относят показатели не количественные, а качественные (цвет, химический состав и т. д.). Качественные показатели различных систем часто можно расположить в некотором порядке, так, чтобы их множество напоминало градацию одного свойства.

Можно классифицировать показатели и по другим признакам: 1) по значимости для выполнения функции (важные, неважные и несущественные, а также ненужные, вредные); 2) по связи с другими показателями (независимые и зависимые); 3) по физической природе (геометрические, механические, тепловые, оптические и т. д.); 4) по воздействию на человека (удобство обслуживания, физическая и психологическая утомляемость, эстетическое воздействие); 5) по качеству функционирования (надежность, безопасность и т. д.).

Количественный показатель является положительным, если его значение желательно (исходя из надсистемных, очевидных соображений) увеличивать, и отрицательным, если его значение желательно уменьшать (вплоть до нуля). Если сравнивать между собой две технические системы, выполняющие одну и ту же функцию, то в общем случае они будут иметь различные значения однотипных количественных показателей. При этом по ряду одних показателей может быть лучшей первая система, а по ряду других — вторая. Для того чтобы определить, какая из этих систем лучше в целом, вводят интегральный показатель — *критерий качества системы*, который является некоторой функцией положительных и отрицательных показателей, причем значение критерия качества системы должно увеличиваться при увеличении положительных и уменьшении отрицательных показателей.

Кроме того, желательно, чтобы критерий качества системы был безразмерной величиной и определял меру соответствия ее показателей предъявляемым к ним требованиям, т. е. если положительные показатели меньше, а отрицательные больше этих требований, то критерий качества системы должен быть равен нулю.

Совокупность значений показателей системы в определенный момент времени называется *состоянием системы*. Поведение системы описывается множеством последовательных во времени состояний.

Эволюция системы может быть задана как характер изменения ее конфигурации и технической характеристики в ответ на изменение состояния окружающей среды или с течением времени.

На рис. 1.1 показана упрощенная функциональная конфигурация (без энергетических потоков) машиностроительного предприятия (МП); где УПР — подсистема управления; СКЛ — подсистема

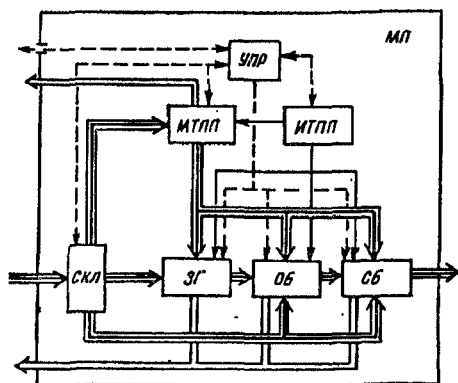


Рис. 1.1. Функциональная конфигурация машиностроительного предприятия (потоки: \Rightarrow материалов и изделий; \Rightarrow отходов; \rightarrow технологической информации; $-\ - \rightarrow$ директивной и отчетной информации)

складирования; ЗГ — подсистема изготовления заготовок; ОБ — подсистема обработки заготовок; СБ — подсистема сборки машин; МТПП — подсистема материально-технологической подготовки производства; ИТПП — подсистема информационно-технологической подготовки производства. Функции указанных подсистем определены их наименованием. В ЗГ, ОБ и СБ реализуются в основном рабочие функции предприятия, а в остальных его функциональных компонентах — обеспечивающие, которые необходимы для того, чтобы можно было реализовать рабочие функции.

Функции предприятия реализуются в производственном процессе, который также можно рассматривать как сложную систему. Обычно в производственном процессе выделяется ряд процессов технологического характера, во время которых происходит качественное изменение объекта производства (форма, размеры, механические свойства и т. д.). Такие процессы называют *технологическими* (ТП). Они протекают в пространственно-функциональных компонентах машиностроительного предприятия — цехах, производственных участках (отделениях). Технологические процессы машиностроительного предприятия принято делить на три группы: заготовительные, обрабатывающие и сборочные.

Заготовительные процессы осуществляются в литейном, кузнечном и других заготовительных цехах, где из исходных материалов изготавливаются заготовки деталей машин (литые, кованные, штампованные, вырезанные из проката, а также сварные). *Обрабатывающие процессы* предназначены для того, чтобы придать заготовкам требуемую форму, размеры и механические свойства. Их осуществляют в механических, термических и гальванических цехах. *Сборочные процессы* проводят в сборочных цехах или на участках механосборочных работ, где из деталей машин, изготовленных на предприятии, покупных деталей и изделий собирают машины.

К технологическому процессу относят также контроль качества,

очистку, а иногда и транспортировку, которые, хотя и не изменяют объект производства, тесно связаны с процессами обработки и сборки или входят в них составной частью.

К *обеспечивающим (сервисным) процессам* относят энерго- и теплоснабжение, транспортировку и складирование, ремонт технологического оборудования, изготовление технологической оснастки и тары, технологическую подготовку производства, планирование, контроль, управление и т. д. Центральное место в этой группе процессов следует отвести информационно-технологической подготовке производства, так как от ее своевременности и качества зависят качество управления производством и эффективность технологических процессов.

Технологические службы предприятия обеспечивают поток технологической информации, записанной в технологических картах, инструкциях, управляющих программах для технологического оборудования с ЧПУ и отраженной в материальных и трудовых нормативах, чертежах приспособлений и специального инструмента. Цеховые технологи проводят испытание и внедрение технологических процессов и оснастки, контроль за соблюдением технологической дисциплины, анализ причин брака и разработку мероприятий по повышению качества и эффективности технологических процессов.

В связи со сложностью и разнообразием технологических процессов машиностроения в технологических службах предприятия существует разделение труда: технологи отдела главного металлурга занимаются литейным и кузнечным производством, сваркой, термической обработкой и нанесением покрытий, а технологи-машиностроители (отдел главного технолога) — механической обработкой и сборкой.

Одной из главных системных характеристик машиностроительного производства является уровень его специализации. По этому признаку выделяют единичное, серийное и массовое производство. *Единичное производство* характеризуется малым объемом выпуска одинаковых машин (или их компонентов), повторное изготовление которых обычно не предусматривается. *Серийное производство* обеспечивает изготовление машин периодически повторяющимися партиями (сериями). В зависимости от объема и частоты повторения выпуска партий различают *мелкосерийное, серийное и крупносерийное производство*. *Массовое производство* характеризуется большим объемом выпуска одинаковых машин, непрерывно изготавливаемых в течение длительного (5...10 лет) периода времени. На одном и том же машиностроительном предприятии обычно существуют разные типы производства, например крупно- и мелкосерийное.

1.2. Дерево целей и функциональная структура курса «Основы технологии машиностроения»

Технология машиностроения как научная дисциплина возникла в СССР в 30-х гг. в связи с быстрым ростом отечественного машиностроения. Сложность процессов, связанных с механической обработкой, привела к разделению единой научно-технической дисциплины ("Технология металлов") на несколько: теория резания, режущий инструмент, металлорежущие станки, проектирование технологической оснастки и технология машиностроения. Курс «Основы технологии машиностроения» является специальным для студентов, которые готовятся стать инженерами специальности Т 03.01.04 (1202), и профилирующим для специальности Т 03.01.01 (1201). Цель изучения этого курса для указанных специальностей — получение теоретической основы и некоторых навыков проектирования технологических процессов изготовления (механической обработки деталей и сборки) машин.

Но такое декларативное представление цели не дает рекомендаций по ее достижению, так как не определено само понятие «проектирование», не указаны варианты условий, в которых оно протекает.

С системных позиций и курс «Основы технологии машиностроения», и процесс проектирования технологических процессов необходимо рассматривать как информационные системы. С этой точки зрения проектирование технологического процесса изготовления машины (или ее компонентов) есть сложная иерархическая процедура формирования информационной модели (т. е. описания его элементов и структуры, оформленного в соответствии с ГОСТом).

Описание элемента технологического процесса содержит: 1) сведения о действиях, производимых над объектом производства; 2) сведения о показателях его состояния после выполнения указанных действий; 3) сведения об основном технологическом оборудовании, приспособлениях и инструментах; 4) сведения о показателях режима работы технологического оборудования для каждого инструмента; 5) сведения о затратах времени (и денег для оплаты работы оператора) на выполнение указанных действий; 6) управляющую программу (при использовании технологического оборудования с ЧПУ).

Сведения для описания элемента технологического процесса можно разделить на две группы: структурные и параметрические. К первым относятся сведения, отмеченные в пп. 1...3, ко вторым — сведения, отмеченные в п. 4 и связанном с ним п. 5. Сведения, отмеченные в п. 6, — это вся информация (пп. 1...5), но только на языке, «понятном» оборудованию с ЧПУ. При проектировании структурные сведения обычно выбираются из определенных массивов (справочников), реже комбинируются из типовых элементов более

низкого порядка иерархии, также предварительно описанных и систематизированных. Параметрические сведения являются результатом расчета. Структура технологического процесса связывает его элементы порядком следования и способом совмещения как элементов самого процесса, так и объектов производства на каждой используемой единице технологического оборудования.

В ходе проектирования технологического процесса используются различные виды связей между элементами системы проектирования: математические модели, позволяющие выполнять расчеты показателей; логические связи, которые дают возможность выявлять соответствие методов обработки и сборки объекту производства; иерархические и информационные связи, позволяющие оценивать качество изготовления машины.

Данный анализ понятия «проектирование технологического процесса» позволяет провести иерархическую декомпозицию (разделение) глобальной цели изучения курса «Основы технологии машиностроения», т. е. построить так называемое *дерево целей* курса. На первом уровне декомпозиции можно выделить следующие цели: 1) усвоение методики проектирования технологического процесса; 2) усвоение методики его совершенствования. Каждую из этих локальных целей на втором уровне декомпозиции можно соответственно разделить в первом случае на усвоение методики выбора элементов технологического процесса, усвоение методики синтеза его структуры, усвоение методики оптимизации параметров, а во втором случае — на усвоение методики синтеза новых способов изготовления машин и их элементов, усвоение организационно-технологических методов повышения эффективности технологического процесса.

Дальнейшая детализация целей в данном случае не имеет смысла, так как на следующих уровнях декомпозиции нужно будет переходить уже к конкретным алгоритмам или темам.

Функциональная конфигурация курса «Основы технологии машиностроения» обуславливается деревом его целей, но не может быть построена как прямое отражение элементов его нижнего уровня, так как при этом получится совокупность рецептов-предписаний, а не теоретико-прикладная система знаний. Кроме того, помимо внешних целей курса «Основы технологии машиностроения», состоящих в обслуживании инженерной деятельности технологов и конструкторов-машиностроителей, имеют место и внутренние цели, направленные на оптимизацию формы, организации и изложения информационного фонда курса. Критериями оптимизации являются: компактность, доступность и систематичность изложения информации. Компактность обеспечивается повышением уровня обобщения высказываний и предписаний теории проектирования технологиче-

ского процесса, доступность — повышением ясности и четкости алгоритмов решения типовых задач, повышением наглядности и четкости описаний, оптимизацией уровня сложности моделей, используемых при проектировании. Однако применение ЭВМ снимает последнее ограничение. Систематичность изложения достигается тем, что использование i -го элемента информационного фонда курса не предшествует его изложению.

1.3. Машина как объект производства

Машина (как и ее части) является технической системой, которая создается для выполнения определенных функций, т. е. имеет определенное служебное назначение. *Функциональными компонентами машины* называют сборочные единицы (узлы) различных уровней сложности, детали и части деталей, включая неделимые элементы.

Функционально-сборочной единицей машины будем называть множество связанных деталей, в совокупности выполняющих хотя бы одну функцию по обеспечению работы других функциональных элементов или всей машины. Крупные функционально-сборочные единицы часто можно разделить на более простые.

Деталью машины будем называть отдельное тело из однородного материала, имеющее определенную геометрическую форму и выполняющее хотя бы одну функцию по обеспечению работы других функциональных элементов или всей машины.

Неделимым элементом называют часть детали (или одну деталь), выполняющую не менее одной функции по обеспечению работы других элементов.

Основные (или исполнительные) элементы машины — это те элементы, которые непосредственно взаимодействуют с объектами N (см. формулу (1.1)) от исходного состояния до конечного результата (R) и функция которых совпадает с функцией машины. Аналогично можно выделить основные элементы любой функциональной единицы машины.

Кроме основных, в машине обычно имеются *вспомогательные элементы*. Несущие элементы обеспечивают определенность взаиморасположения и (или) относительного движения других элементов машины. Элементы связи обеспечивают определенную степень свободы (от нуля до пяти) движения одних элементов по отношению к другим. Элементы передачи передают на расстояние механическую энергию движения и (или) статические силы и моменты с одновременным их преобразованием. Элементы управления осуществляют сбор, хранение и переработку информации для выработки управляющего воздействия и передачу его исполнительным элемен-

там. Двигатели преобразуют энергию заданного вида (обычно электрическую) в механическую.

Движители преобразуют работу двигателя или другого источника энергии в работу на преодоление сил сопротивления движению машины. Элементы гашения скоростей и ускорений уменьшают скорость движения или амплитуду колебаний. Иногда перечисленные элементы трудно выделить, так как часто многие узлы и детали выполняют одновременно несколько функций.

В процессе работы между элементами машины возникают и действуют размерные, кинематические, силовые, физико-химические и временные связи и отношения. Следует отметить, что все виды отношений и связей закладываются в машину в процессе ее создания в виде размерных отношений (размеров, расстояний, относительных поворотов, формы и микрогеометрии поверхностей деталей) и в виде наборов свойств материалов, из которых изготовлены детали машин.

Функции машины и ее элементов отражены в *технических требованиях* (ТТ) — системе качественных показателей с установленными на них количественными значениями. Для любого показателя качества P следует различать заданное ($P_{зад}$), действительное ($P_{дт}$) и измеренное ($P_{из}$) значения. Точность изготовления машины (или ее элементов) характеризуется степенью приближения действительных значений показателей качества к заданным. Точность измерения показателя качества определяется степенью приближения измеренного значения к действительному. Вообще, точность оценивается отклонением (Δ), на которое налагается допуск.

Допуском называют всякое ограничение любого показателя качества. Он характеризует требуемую точность. Фактическая точность для отдельного элемента характеризуется фактическим отклонением, а для множества одноименных элементов машины — полем рассеяния. Схема показателей качества дана на рис. 1.2.

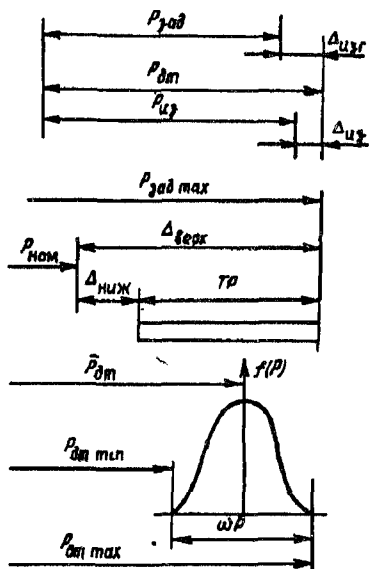


Рис. 1.2. Схема соотношения значений и характеристик показателя качества P ($P_{ном}$ — номинальное значение, $\Delta_{верх}$, $\Delta_{ниж}$ — верхнее и нижнее допускаемые отклонения; ωP — поле рассеяния; $f(P)$ — плотность вероятности; TP — допуск)

Все технические требования можно разбить на следующие группы: ТТ1 — функциональные требования; ТТ2 — требования к взаимодействию машины и человека; ТТ3 — требования к взаимодействию машины и окружающей технической среды; ТТ4 — требования к взаимодействию машины и окружающей физической среды. Функциональные требования ТТ1 представляют собой чаще всего самую важную и многочисленную группу, всегда присутствующую в полном списке ТТ.

Классификацию элементов машины удобнее начинать с классификации форм неделимых элементов — типовых поверхностей деталей, так как мощность их множества существенно ниже мощности множества самих деталей, а тем более множества сборочных единиц. Цель классификации — свести многообразие форм поверхностей к сочетанию ограниченного числа элементов и признаков. Наиболее экономной является система классификации с иерархическим подчинением признаков, когда каждый признак нижней ступени классификации конкретизирует признак высшей ступени. При этом действует принцип, согласно которому все члены классификационного деления на каждой его ступени исключают друг друга. Задача классификации существенно упростится, если в основу систематизации положить закономерности формообразования поверхностей.

Большинство поверхностей в деталях машин относится к числу кинематических, т. е. они могут быть получены перемещением некоторой плоской кривой (образующей) по другой, неподвижной в пространстве (направляющей). При этом направляющая и образующая имеют одну общую точку, в которой угол между касательной к образующей и плоскостью, содержащей направляющую, чаще всего является постоянным. В общем случае размеры и форма образующей в процессе движения могут изменяться.

Самая высокая степень классификации поверхностей — *класс*, признаком которого является закон движения образующей (т. е. вид направляющей). По этому признаку все поверхности делятся на пять классов: 1) плоские поверхности, направляющей которых является прямая; 2) поверхности вращения, направляющей которых будет окружность; 3) винтовые поверхности, направляющая которых — винтовая линия; 4) зубчатые поверхности, направляющими которых являются периодические кривые разных типов; 5) фасонные поверхности, направляющие которых — алгебраические или трансцендентные кривые.

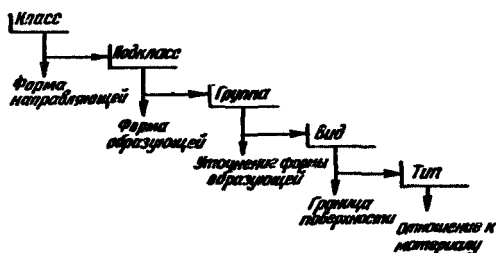
Подкласс отражает совокупность форм образующих, обладающих некоторым общим признаком, а *группа* уточняет форму образующей. Следующей ступенью классификации является *вид* поверхности, который определяет форму границ поверхности по длине или, другими словами, свободу выхода инструмента. На этой ступени по-

верхности делятся на открытые, полуоткрытые и закрытые. В зависимости от расположения поверхности относительно материала детали на последней ступени классификации выделяются два типа поверхностей: наружные и внутренние.

Схема классификационной иерархии поверхностей деталей машин показана на рис. 1.3. Подробные классификационные таблицы форм поверхностей деталей машин приведены на рис. 1.4...1.8. Эти таблицы показывают, что не все группы поверхностей имеют полный набор видов и не у всех видов поверхностей могут быть реализованы оба типа. Например, окна в классе плоских поверхностей могут быть только закрытыми и внутренними, а направляющие обычно бывают только открытыми. Канавки поверхностей вращения могут быть только полуоткрытыми, а резьбы не могут быть закрытыми.

Для полного описания типовой поверхности необходимо указать еще ее геометрические и механические показатели качества. На чертеже эти показатели задаются размерами с указанием допустимых отклонений (размеров, относительного положения и формы), значениями Ra (или Rz) и твердостью.

Рис. 1.3. Классификация типовых поверхностей деталей машин по форме



Плоские поверхности												
Плоскости			Паз		Выступ		Окно		Направляющая			Многогранный
Без выступов	С выступом прямой	С выступом искривленный	Прямой угловой	Триугольный	T-образный	Несимметричный	Прямое	Скругленное	Прямая	Угловая	Ласточкин хвост	Многогранный
Открытая	Полуоткрытая		Открытая	Полуоткрытая		Закрытая		Вид	Открытая	Полуоткрытая		
									Наружная			
									Внутренняя			

Рис. 1.4. Классификационная таблица плоских поверхностей

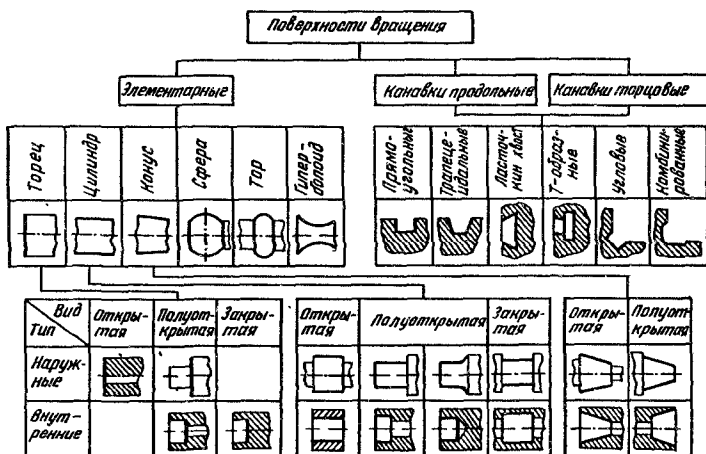


Рис. 1.5. Классификационная таблица поверхностей вращения

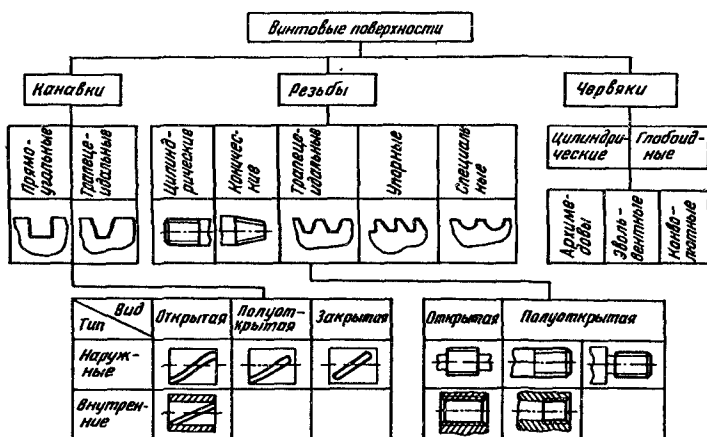


Рис. 1.6. Классификационная таблица винтовых поверхностей

Размеры многих типовых поверхностей (зубчатых, резьб, T-образных канавок и т. д.) можно разделить на *независимые* (или *определяющие*) и *зависимые*, значения которых определены значениями независимых размеров. Так, модуль и число зубьев прямозубой шестерни определяют наружный, средний и внутренний

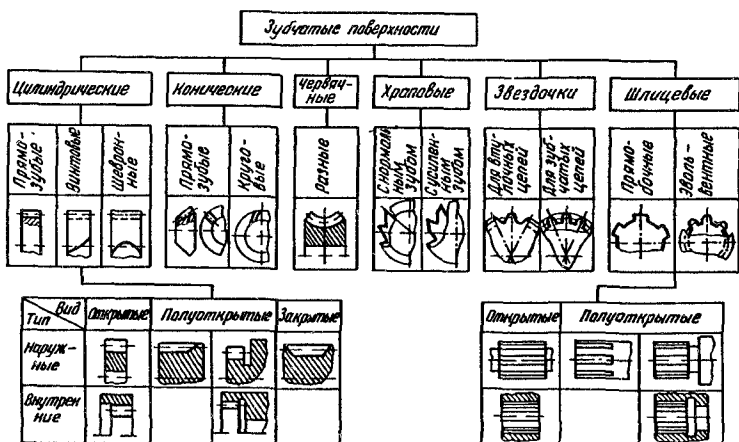


Рис. 17. Классификационная таблица зубчатых поверхностей

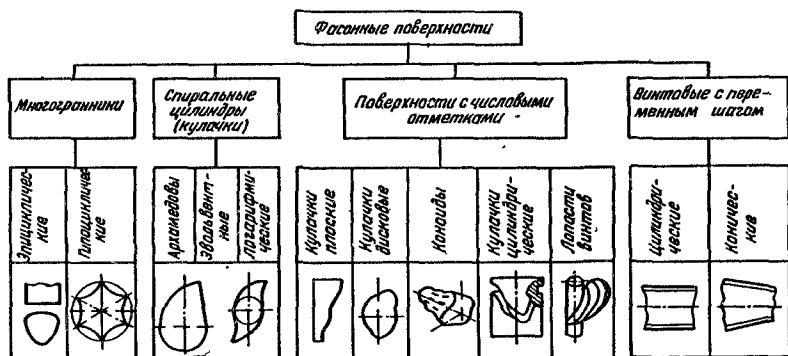


Рис. 1.8. Классификационная таблица фасонных поверхностей

диаметры зубчатого венца, высоту и толщину зуба, параметры его эвольвентного профиля.

Кроме того, границы типовых поверхностей «снабжаются» вспомогательными поверхностями: фасками, канавками для выхода инструмента и (или) галтелями. Размеры этих поверхностей, которые чаще всего выполняют свою функцию только в процессе изготовления детали или машины, также являются зависимыми.

С каждой типовой поверхностью можно связать локальную систему координат с главной осью Z_i . Тогда относительное распо-

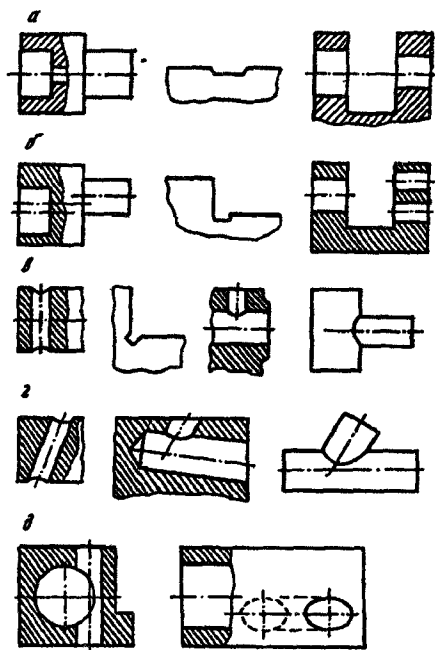


Рис. 1.9. Варианты относительного расположения типовых поверхностей:
a — соосных; *б* — параллельных; *в* — пересекающихся перпендикулярно; *г* — пересекающихся под углом; *д* — скрещивающихся

Размеры фаски и канавки для выхода инструмента зависят от размера D . Соосно с основным отверстием расположено отверстие 2, размеры D_1 и L_1 которого зависят от D . Требования к перпендикулярности торцов 3 и 4 к оси отверстия 1 зависят от требований точности, предъявляемых к отверстию 1 (его диаметру D). В функциональный модуль входит также n резьбовых отверстий глубиной l , количество которых, радиус их расположения R , параметры резьбы и ее длина l_1 также зависят от D . В целом рассматриваемый функциональный модуль включает 26 типовых поверхностей.

Многие нормализованные детали (пальцы, фланцы, крышки, детали муфт и т. д.) образуют единый функциональный модуль. Например, крышка, с помощью которой будет закрепляться шарикоподшипник в основном отверстии корпуса (см. рис. 1.10), представляет собой функциональный модуль, все размеры которого зависят от D .

Функциональные модули детали выполняют функции ориентации (с лишением шести, пяти или четырех степеней свободы) самой

жение двух типовых поверхностей (i -й и j -й) в детали характеризуется расстоянием между началами их локальных систем координат (O_i и O_j), а также углами между главными локальными осями Z_i и Z_j . На рис. 1.9 показаны варианты относительного расположения типовых поверхностей.

Несколько типовых поверхностей детали, выполняющих одну общую функцию или некоторый набор однородных функций, назовем функциональным модулем детали. Очень часто в нем можно выделить определяющие и зависимые размеры. Например, на рис. 1.10 показан функциональный модуль корпусной детали, служащий для ориентации и закрепления шарикоподшипника. Он состоит из основного полуоткрытого отверстия 1, размеры D и L которого являются независимыми. Раз-

детали в сборочной единице или присоединяемой к ней детали, а также восприятия сил и моментов. Кроме функциональных модулей, функциональных типовых поверхностей и вспомогательных поверхностей, деталь имеет так называемые *свободные поверхности*, которые выполняют функции объединения функциональных элементов в деталь.

Конструкторско-технологическая классификация деталей машин является задачей намного более сложной, чем классификация их компонентов. Решение этой задачи было начато в 1937 г. А. П. Соколовским и затем продолжено в работах Ф. С. Демьянюка и Е. И. Глущенко. Однако разработать детальный общемашиностроительный классификатор, который мог бы служить рабочим документом технологу-машиностроителю, пожалуй, невозможно. Задача становится реальной, если проводить классификацию в пределах отрасли машиностроения, а еще лучше — в пределах предприятия.

Классификацию деталей следует проводить по следующим четырем признакам: 1) функционально-геометрическому; 2) размерному; 3) точностному; 4) по применяемому материалу. Геометрическая форма детали предопределяется ее функцией и вместе с габаритными размерами, показателями точности, материалом и его твердостью предопределяет технологию ее изготовления для конкретного типа производства.

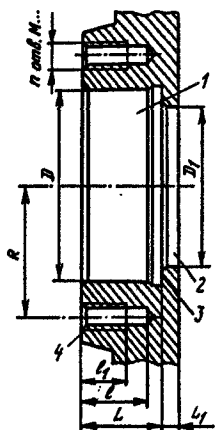


Рис. 1.10. Функциональный модуль корпусной детали

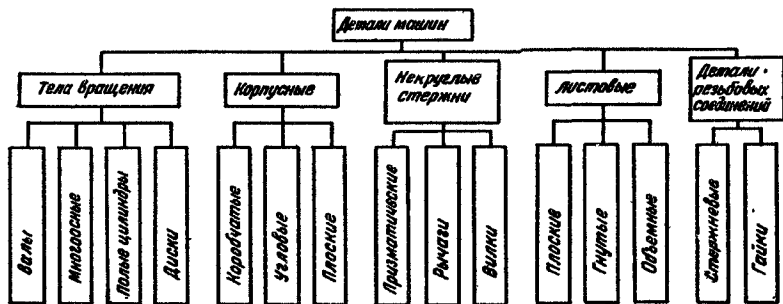


Рис. 1.11. Классификация деталей машин по форме (классы и подклассы)

В основу иерархической системы конструкторско-технологической классификации (рис. 1.11) положены и геометрическая форма, и служебное назначение (функция) детали, тесно связанные между собой. На следующих уровнях классификации форма деталей уточняется. Например, подкласс «валы» делится на группы: 1) ступенчатые валы; 2) шпиндели; 3) валы шестерни; 4) ходовые винты; 5) валы-червяки; 6) кулачковые валы. Затем, в зависимости от наличия осевого и радиального отверстий, шпоночных пазов, шлицевых поверхностей, резьб и комбинаций указанных функциональ-

и т. д.

Следует отметить, что в каждой отрасли машиностроения применяется набор деталей оригинальной формы, которые редко или совсем не встречаются в машинах других отраслей (например, станины и шпиндели металлорежущих станков; цилиндры, ленточные матрицы, шпационные клинья и рамы полиграфических машин; иглы и цилиндры вязальных машин и т. д.). С другой

точные (6-й, 7-й качества), средней точности (8...10-й качества), неточные (11...14-й качества).

По четвертому признаку (применяемому материалу) детали разделены на семь групп: 1) из сталей конструкционных; 2) из сталей легированных; 3) из чугунов; 4) из алюминиевых сплавов; 5) из медных сплавов; 6) из пластмасс; 7) из прочих материалов. Механические свойства и обрабатываемость резанием стали существенно изменяются в результате термической обработки. Поэтому в первой и второй группах выделяются следующие подгруппы деталей: 0) из стали в состоянии поставки; 1) из улучшаемой стали; 2) из цементируемой стали; 3) из закаливаемой стали.

Множество деталей становится системой (функциональной единицей и (или) машиной), когда между ними с помощью различных соединений устанавливаются размерные связи. Классификация соединений деталей в машиностроении приведена на рис. 1.12.

1.4. Компоненты технологических процессов изготовления деталей машин

Технологический процесс изготовления машины и ее элементов (деталей) дискретен в пространстве и времени. Он состоит из циклически повторяющихся для каждого объекта производства компонентов. С пространственно-функциональной точки зрения в технологическом процессе можно выделить следующие уровни иерархии разделения: этапы, операции, установки, позиции, переходы и проходы.

Главным признаком *этапа* является уровень показателей качества обработанных поверхностей (качество точности IT размера, параметр шероховатости Ra , твердость HB или HRC₂ материала), достигнутый после выполнения этого этапа. Таким образом, технологический процесс изготовления детали на первом уровне делится на этапы, совокупность которых образует *типовую схему обработки*.

Каждый этап состоит из одной или нескольких операций. *Операцией* будем называть законченную, повторяющуюся часть технологического процесса, которая выполняется на одном рабочем месте (на определенной технологической машине). Совокупность упорядоченных операций образует *маршрут обработки*. Операция является также основным организационным элементом технологического процесса.

Основным признаком *установы* является неизменность положения обрабатываемой заготовки относительно станочного приспособления. В каждой операции может быть один или несколько (редко более двух) установов. На многопозиционных станках заготовка вместе с приспособлением последовательно переходит из одной ра-

бочей позиции в другую, где она фиксируется на время обработки. На многих станках, кроме рабочей, выделяется *позиция* загрузки заготовки в приспособление.

Элементарным переходом будем называть законченный процесс образования одной типовой поверхности детали при ее обработке одним инструментом с конкретными режимами резания. *Инструментальным переходом* называется законченный процесс образования нескольких типовых поверхностей детали одним инструментом с конкретными режимами резания. *Блочным* называют переход, при котором выполняется законченный процесс образования поверхностей с помощью всех инструментов, закрепленных в блоке (суппорте, многшпindleйной головке и т. д.). *Позиционный переход* — это совокупность всех блочных, а следовательно, и всех инструментальных переходов, выполняемых при обработке заготовки в одной рабочей позиции станка. *Вспомогательным переходом* называют часть процесса, связанную со вспомогательными движениями рабочего и (или) механизмов станка, циклично повторяющимися и необходимыми для обработки заготовки на станке. Таким образом, операция — это комплекс всех инструментальных и вспомогательных переходов, выполняемых на одном рабочем месте с помощью определенного оборудования и оснастки.

Каждый элементарный переход можно формально представить некоторым множеством структурных и параметрических признаков. К первым относятся коды формы обработанной поверхности, инструмента, станка и схемы установки заготовки, ко вторым — размеры обработанной поверхности и допуски на них, показатели режима обработки (скорость резания v , подача s , глубина резания t) и припуск z . Все это относится и к инструментальному, блочному и позиционному переходам, а также может быть распространено на операцию. Если толщина срезаемого слоя (припуск z или напуск) больше допустимой глубины резания (t), то элементарный переход выполняется в несколько *проходов*.

Количество рабочих позиций станка, установов, инструментов и заготовок в каждой рабочей позиции, характер совмещения переходов и заготовок в рабочей позиции, характер совмещения вспомогательных и инструментальных переходов, способ получения размера и смены инструмента определяют временную структуру операции. Классификация структур операций по указанным признакам осуществляется следующим образом. По количеству рабочих позиций P на станке операции делятся на *однопозиционные* (P_1) и *многопозиционные* (P_n). В зависимости от количества инструментов I (переходов) в каждой рабочей позиции различают *одноинструментные* (I_1) и *многоинструментные* (I_m) операции. В

зависимости от количества заготовок D , обрабатываемых в каждой позиции, различают *однодетальные* (D_1) и *многодетальные* (D_k) операции. Аналогично в зависимости от количества установов $У$, выполняемых в рабочей позиции, различают *одноустановные* ($У_1$) и *многоустановные* ($У_y$) операции.

По способу совмещения переходов и заготовок в рабочих позициях различают: *несовмещенные* (0) операции, операции с *последовательным* (1) или *параллельным* (2) совмещением переходов и (или) заготовок, а также операции с *последовательно-параллельным совмещением* (3). Обычно обработка в разных рабочих позициях станка проводится одновременно (параллельно), но бывают станки, где обработка в разных рабочих позициях проводится последовательно, т. е. пока идет обработка в одной из позиций, инструменты в других простаивают.

В многоустановных операциях, когда в каждой рабочей позиции находится несколько приспособлений, использующих различные схемы установки, а заготовки после обработки в одном приспособлении последовательно переключаются в другие, возможно как последовательное, так и параллельное совмещение переходов. Способ совмещения кодируется соответствующим символом (0, 1, 2 и 3), который записывается как показатель степени над символами качественных признаков (Π , I , D и $У$).

По характеру совмещения вспомогательных и инструментальных ходов различают: *однозонные периодические* ($Z_1^{по}$), *двухзонные периодические* ($Z_2^{по}$) и *двухзонные непрерывные* ($Z_2^{неп}$) операции. В первом случае на станке рабочая зона совпадает пространственно с зоной загрузки заготовки. Следовательно, совмещение во времени вспомогательных и инструментальных переходов невозможно. В двухзонных операциях зона загрузки выделена пространственно и поэтому вспомогательные переходы могут полностью или частично совмещаться во времени с инструментальными.

В периодических операциях после выполнения рабочих движений инструмент и (или) заготовка возвращаются в исходное положение, т. е. выполняется вспомогательный переход, не совмещенный с инструментальным. А в непрерывных операциях вектор подачи заготовки в рабочую зону совпадает с вектором рабочей подачи, обработка ведется «на проход», поэтому нет необходимости в выполнении вспомогательного перехода возврата в исходное положение.

В операциях с последовательным и последовательно-параллельным совмещением инструментальных (блочных) переходов смена инструмента может быть ручной ($C_{руч}$) либо автоматической

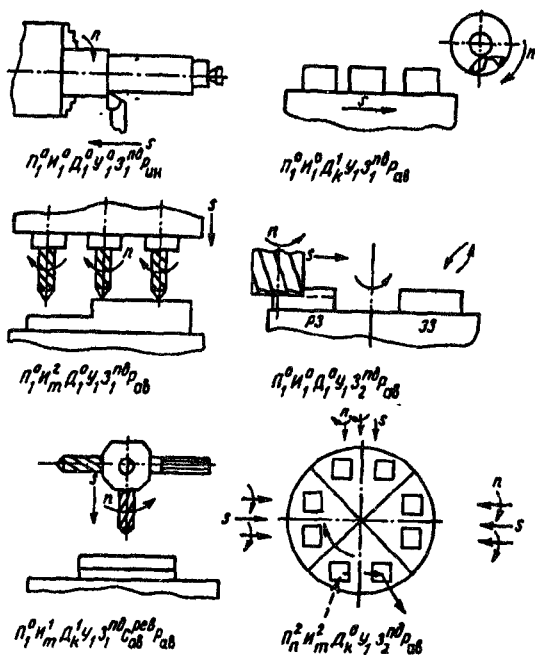


Рис. 1.13. Схемы и коды временных структур операций (→ — условное обозначение инструмента; PЗ — рабочая зона (позиция) станка; ЗЗ — зона загрузки)

($C_{ав}$). В последнем случае смена инструмента может осуществляться либо из магазина ($C_{ав}^{Маг}$), либо поворотом револьверной головки ($C_{ав}^{Рев}$).

В зависимости от применяемого метода размерной настройки инструмента различают: операции с индивидуальной размерной настройкой на каждом повторяющемся переходе ($P_{ин}$) и операции с размерной настройкой на обработку партии заготовок ($P_{ав}$), когда размеры выполняются автоматически. К последним относят также обработку мерным инструментом на токарных станках (сверло, зенкер и т. д.). На рис. 1.13 показаны некоторые примеры структур операций и соответствующие им коды. Код может быть полным и неполным, когда нет необходимости в некоторых символах. Например, если в рабочей зоне только один или несколько параллельно работающих инструментов (I_1, I_m^2), нет необходимости в символе характера смены инструмента (C).

Временная структура операции определяет структуру и уровень затрат времени на ее выполнение. В общем случае фактическое время, затраченное на выполнение операции ($\tau_{факт}$), состоит из штучно-калькуляционного времени ($\tau_{шк}$), доли потерь времени по

организационно-техническим причинам ($\tau_{п.от}$) и доли потерь времени на ожидание загрузки оборудования ($\tau_{0.3}$), т. е.

$$\tau_{факт} = \tau_{шк} + \tau_{п.от} + \tau_{0.3},$$

где $\tau_{п.от} = \tau_{п.в} + \tau_{п.о}$; $\tau_{п.в}$ — доля потерь времени на восстановление работоспособности; $\tau_{п.о}$ — доля потерь времени по организационным причинам. Доля потерь времени $\tau_{п.от}$ и $\tau_{0.3}$ учитывается в расчетах на основании нормативов как определенный процент от $\tau_{шк}$.

Штучно-калькуляционное время состоит из штучного ($\tau_{ш}$) и доли подготовительно-заключительного ($\tau_{пз}$), а последнее — из времени на подготовку операции ($\tau_{п.оп}$) и времени наладки ($\tau_{нал}$), т. е.

$$\tau_{шк} = \tau_{ш} + \tau_{пз}/N_{пт} = \tau_{ш} + (\tau_{п.оп} + \tau_{нал})/N_{пт}, \quad (1.2)$$

где $N_{пт}$ — размер партии обрабатываемых заготовок.

Штучное время состоит из оперативного ($\tau_{оп}$), затрачиваемого на обслуживание рабочего места оператором ($\tau_{об}$) и на регламентированный отдых ($\tau_{от}$), т. е.

$$\tau_{ш} = \tau_{оп} + \tau_{об} + \tau_{от}. \quad (1.3)$$

Время на обслуживание и отдых составляет определенный процент от $\tau_{оп}$. Он принимается в зависимости от условий обработки по соответствующим нормативам. А оперативное время состоит из основного ($\tau_о$), которое затрачивается на выполнение рабочих ходов, и вспомогательного ($\tau_в$), которое в свою очередь можно разделить на две части: зависящую от режима резания ($\tau_{в1}$) и не зависящую от него ($\tau_{в2}$). Первая часть затрачивается на смену затупившегося инструмента ($\tau_{с.и}$) и размерную настройку ($\tau_{р.н}$), а вторая — на вспомогательные перемещения ($\tau_{в.п}$), на загрузку-выгрузку заготовки ($\tau_{з.в}$), на манипуляции, связанные с переходом ($\tau_{прх}$), в которые входят смена инструмента в цикле, переключение режимов резания, пуск и остановка рабочих органов станка, контроль и т. д. Таким образом,

$$\tau_{оп} = \tau_о + \tau_{в1} + \tau_{в2}, \quad (1.4)$$

где

$$\tau_{в1} = (\tau_{с.и} + \tau_{р.н})/N_{п.с}; \quad \tau_{в2} = \tau_{в.п} + \tau_{з.в} + \tau_{прх}; \quad (1.5)$$

$N_{п.с}$ — количество деталей, обработанных за период стойкости.

Указанная выше структура затрат относится к работе в условиях серийного производства. При работе в условиях массового производства $\tau_{пз}$ пренебрежимо мало и может не учитываться.

Структура операции определяет уровень затрат основного и вспомогательного времени. Так, например, для операций с последовательным совмещением переходов (I_m^1)

$$\tau_o = \sum_{i=1}^m \tau_{oi}, \quad (1.6)$$

где m — число переходов; τ_{oi} — основное время на i -й переход.

А для операций с параллельным совмещением переходов (I_m^2)

$$\tau_o = \tau_{o.л}, \quad (1.7)$$

где $\tau_{o.л}$ — основное время лимитирующего (наиболее длительного) перехода.

Для двухзонной периодической операции ($Z_2^{по}$) время $\tau_{з.в}$ обычно принимают равным нулю, так как оно перекрывается (параллельно совмещается) основным. Более подробно влияние временной структуры операции на уровень затрат времени для ее выполнения будет рассмотрено далее.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Назовите характеристики технической системы (ТС).
2. Дайте определение понятия «функция ТС».
3. Дайте определение понятия «структура ТС».
4. Назовите виды показателей качества ТС.
5. Назовите элементы функциональной структуры предприятия.
6. Назовите признаки классов типовых поверхностей.
7. Назовите признаки подклассов и групп типовых поверхностей.
8. Назовите признаки видов типовых поверхностей.
9. Назовите признаки типов типовых поверхностей.
10. Дайте определение понятий функционального и конструкторского модулей поверхностей.
11. Дайте определение понятий функциональной и сборочной единиц.
12. Дайте определение понятий этапа технологического процесса операции, элементарного, инструментального и блочного переходов, установка, позиции, временной структуры операции.
13. Назовите признаки временной структуры операции.

СТРУКТУРНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

2.1. Системные характеристики структурных элементов технологических процессов

Основным структурным элементом технологических процессов изготовления машин или их деталей будем считать *способ* — целенаправленную систему приемов воздействия инструментом на объект производства, выполняемых в заданной последовательности с соблюдением определенных правил. Целью реализации способа является осуществление типового соединения (при сборке) или формообразование типовой поверхности (при механической обработке). Инструментом может быть либо твердое тело определенной формы, либо поток жидкости, плазмы или газа, либо лазерный луч, либо поле той или иной природы.

Структурными элементами способа сборки являются *приемы*: 1) подготовки деталей; 2) ориентации деталей; 3) воздействия инструмента, в результате которого осуществляется сопряжение или закрепление деталей; 4) контроля качества соединения. А структурными элементами способа формообразующей механической обработки являются приемы: 1) ориентации и закрепления заготовки; 2) ориентации инструмента относительно заготовки; 3) сообщения движения заготовке и инструменту; 4) контроля качества формообразования. На рис. 2.1 приведена схема способа сборки тонкостенной втулки 2 и диска 1 с целью осуществления неразъемного неподвижного соединения. Первый элемент структуры данного способа состоит в установке втулки 2 на направляющую оправку 5 и закреплении ее гайкой 4. Благодаря направляющей части оп-

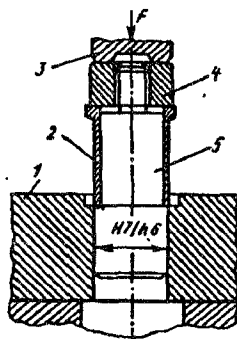


Рис. 2.1. Схема получения неразъемного неподвижного соединения диска с втулкой

равки 5 осуществляется ориентация сопрягаемых деталей с требуемой точностью (второй элемент структуры способа). Рабочая часть инструмента 3 передает требуемое для сопряжения усилие F . После освобождения и извлечения оправки 5 проводится визуальный контроль соединения и, в случае необходимости, контроль прочности соединения, которое должно выдержать заданное осевое усилие. Между элементами структуры способа существуют отношения следования (временные).

К сопрягаемым поверхностям собираемых деталей предъявляются определенные технические требования (точность размеров, формы и шероховатость). Набор этих требований будем называть *входом в способ* как в систему. После осуществления способа собранные детали приобретают новые свойства, которые не были им присущи до сборки. Эти свойства характеризуются полученными показателями соединения и приобретенными пространственными отношениями и связями. Все это можно считать *выходом из способа* как системы. Показатели входа и выхода являются системными характеристиками способа.

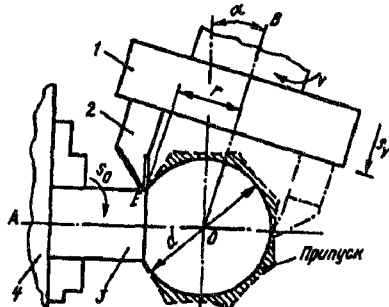


Рис 2.2 Схема формообразования сферической поверхности диаметром d на заготовке

На рис. 2.2 в качестве примера приведена схема обработки сферической поверхности. Заготовка 3 закрепляется в самоцентрирующем патроне 4. Резец 2 закреплен в резцовой головке 1. Оси вращения заготовки (AO) и резцовой головки (OB) пересекаются под углом $90^\circ - \alpha$. Вершина резца 2 находится на расстоянии r от оси вращения резцовой головки. Чтобы получить заданный диаметр d , необходимо вычислить значения α и r по следующей формуле:

$$r = d \cos \alpha / 2.$$

Резцовая головка вращается с частотой, обеспечивающей линейную скорость v вершины резца. Вращающейся головке сообщают движение осевой подачи s_y до тех пор, пока траектория движения вершины резца не будет проходить через ось вращения заготовки и заданную точку E . Затем заготовке сообщается движение подачи s_0 и за один ее оборот обрабатывается вся сфера. При этом подачи s_y и s_0 существенно (на три порядка) меньше скорости v . Перед обработкой сферы хвостовик детали должен быть уже обработан.

Так же, как и способ сборки, способ обработки обладает сис-

темными характеристиками входа и выхода — показателями качества заготовки и обработанной поверхности. Кроме указанных характеристик, к системным следует отнести еще затраты (времени и средств) на выполнение способа.

Любой из способов механической обработки или сборки обладает также определенными ограничениями. Например, рассмотренный способ формообразования сферических поверхностей нельзя применять, если твердость заготовки превышает 41...46 HRC₃ и (или) если требования к шероховатости поверхности и точности размера d очень высоки ($Ra = 0,05$ мкм, IT5).

Во время реализации любого способа на технологическую систему, в которой протекает технологический процесс, действуют неучитываемые, случайные и систематические возмущения, которые приводят к разбросу значений выходных параметров способа. Например, затупление резца, случайные колебания припуска и твердости заготовки приводят к изменению фактического d .

Между значениями показателей выхода, с одной стороны, и контролируруемыми и неконтролируемыми показателями — с другой, обязательно существует корреляционная связь. Модели этой связи чаще всего получают экспериментально, во всяком случае, параметры моделей — обязательно.

Метод изготовления является понятием более широким, чем способ, т. е. в пределах каждого метода может быть реализовано множество разных способов. Например, метод обработки резанием подразделяется на точение, фрезерование, шлифование и т. д. Способ, например точение, имеет разновидности: обтачивание, растачивание, подрезание торца и т. п.

2.2. Признаки классификации методов изготовления деталей машин

В курсе «Основы технологии машиностроения» рассматриваются только те методы изготовления, которые обычно реализуются в подсистеме ОБ машиностроительного предприятия (см. рис. 1.1), т. е. методы обработки (формообразования) поверхностей деталей машин. Исходным материалом являются заготовки, полученные в подсистеме ЗГ.

В основу классификации методов обработки могут быть положены следующие признаки: природа воздействия, играющего главную роль в формообразовании; характер воздействия на заготовку; схема формообразования (сочетание вида инструмента и кинематики формообразования); характер связи формообразующего элемента инструмента с последним звеном энергетического комплекса, сообщаемого движение инструменту; динамика процесса формообразования.

По природе воздействия различают: механическую обработку, электрическую (электроэрозионную, электрохимическую, ультразвуковую), светолучевую, плазменную, комбинированную. В результате механического воздействия происходит пластическое деформирование части материала заготовки (чаще всего с последующим вязким или хрупким разрушением). При светолучевой и плазменной обработке главным является тепловое воздействие, приводящее к плавлению или испарению материала заготовки. При электроэрозионной обработке локальный нагрев обрабатываемой поверхности является результатом короткого искрового или более длительного искродугового электрического разряда между инструментом и заготовкой. В основе процесса электрохимической обработки лежат явления анодного растворения металла электролитом под действием электрического тока или выделение металла из электролита с его осаждением на поверхности заготовки.

По характеру (результату) воздействия на заготовку различают обработку: с частичным удалением материала заготовки, с частичным перераспределением материала заготовки за счет его пластического деформирования, с нанесением (присоединением) материала на заготовку, комбинированными способами воздействия.

При обработке с частичным удалением материала заготовки удаляемый слой называют *припуском*, если форма заготовки подобна форме обрабатываемой поверхности, и *напуском*, если форма заготовки существенно отличается от формы детали (т. е. проще ее).

Схема формообразования дает наименование способу и поэтому является основным признаком классификации. Например, точение — это способ обработки с помощью резца, когда заготовке сообщается вращение, а инструменту — поступательное движение вдоль и (или) поперек оси вращения заготовки. Учитывая неопределенность этого признака, часто уточняют название способа указанием вида обрабатываемой поверхности (например, нарезание резьбы резцом; круглое, плоское или внутреннее шлифование).

Несмотря на коренные различия в природе воздействия на заготовку, всем известным методам и способам обработки присущ общий признак — наличие относительного перемещения заготовки и инструмента в процессе формообразования. При этом форму обрабатываемой поверхности можно рассматривать как след линии (образующей), движущейся в пространстве в соответствии с законом, который определяется другой линией (направляющей); либо как огибающую некоторого семейства поверхностей. В последнем случае образующей является линия соприкосновения огибающей и обрабатываемой поверхностей. В процессе обработки образующую и направ-

ляющую будем различать по следующим признакам: 1) образующая подвижна в пространстве, а направляющая неподвижна; 2) форма и размеры образующей в общем случае переменны, а направляющей — неизменны; 3) скорость образования (генерации) образующей существенно выше, чем направляющей.

Во времени образующая и направляющая могут возникать прерывисто (П), непрерывно (Н) или одновременно (Е). По этому признаку можно выделить следующие схемы формообразования: 1) образующая и направляющая возникают прерывисто (ПП); сюда относят фрезерование тел вращения (рис. 2.3, а), зубофрезерование червячной фрезой, дробеструйную обработку и т. д.; 2) направляющая возникает прерывисто, а образующая — непрерывно (ПН); сюда можно отнести продольное точение (рис. 2.3, б), строгание, торцовое фрезерование плоскости и т. д.; 3) направляющая возникает во времени прерывисто, а образующая — одновременно (ПЕ); сюда относятся фрезерование фасонных канавок (рис. 2.3, в), плоскостей цилиндрической фрезой и т. д.; 4) направляющая и образующая возникают непрерывно (НН); к данной схеме можно отнести поперечное точение с тангенциальной подачей (рис. 2.3, г); 5) направляющая возникает во времени непрерывно, а образующая — одновременно (НЕ); к этой схеме относится обработка отверстия однозубой прошивкой (рис. 2.3, д).

Прерывистый характер генерации производящих линий обрабатываемых поверхностей является одной из причин образования погрешностей формы (шероховатости, волнистости, огранки). Пример формирования этих поверхностей приведен на рис. 2.4, а. Частичное уменьшение погрешности формы направляющей возможно за счет увеличения длины ее контакта с формообразующим элементом инструмента (рис. 2.4, б). Для повышения устойчивости процесса резания часто уменьшают длину контакта формообразующего элемента с образующей (рис. 2.4, в).

На станке каждое движение

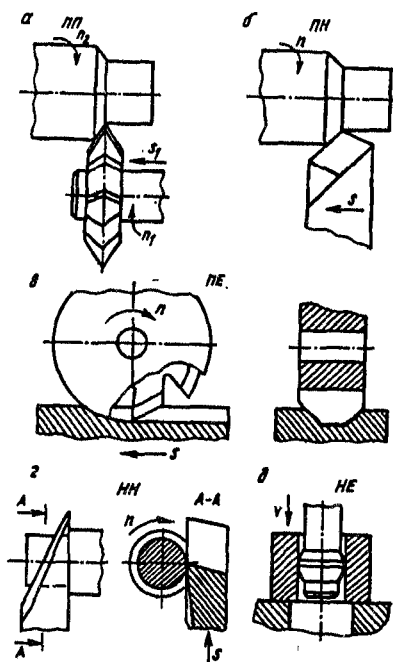


Рис. 2.3. Схемы формообразования в зависимости от типа генерации образующей и направляющей во времени

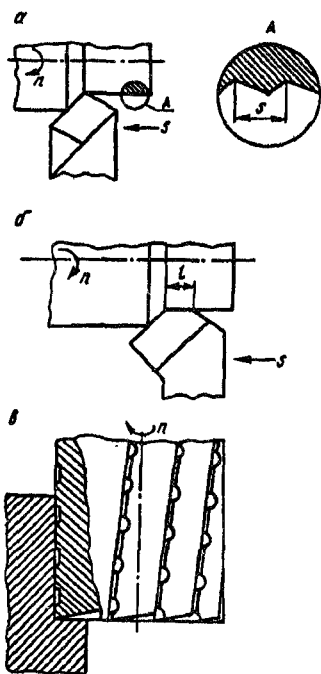


Рис. 2.4. Схемы изменения длины контакта формообразующего элемента с направляющей и образующей

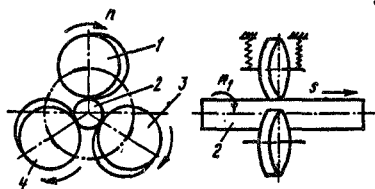


Рис. 2.5. Схема обкатывания с самоподачей

обеспечивается соответствующей кинематической цепью. Все устройства, выполняющие данную функцию, можно разбить на два класса: *направляющие комплексы*, обеспечивающие заданный вид траектории в неподвижной системе координат станка; *энергетические комплексы*, т. е. механизмы, передающие заготовке и инструменту энергию, необходимую для осуществления этого движения. Некоторые схемы формообразования позволяют отказаться от части направляющих комплексов, передав их функцию заготовке или инструменту. Поскольку каждый направляющий комплекс состоит из двух элементов (подвижного и неподвижного), передача его функции может быть полной или частичной. При частичной передаче на станке остается один элемент направляющей пары, а функции второго передаются заготовке или инструменту. При полной передаче из станка изымаются оба элемента направляющей пары, причем функции одного элемента передаются заготовке, а другого — инструменту.

В некоторых случаях функции энергетических комплексов могут частично передаваться заготовке или инструменту. Один из примеров передачи функции направляющего и энергетического комплексов показан на рис. 2.5, где заготовка 2 обкатывается тремя роликами с целью снижения шероховатости ее поверхности. В данном случае функция подвижного направляющего элемента передана обрабатываемой поверхности заготовки. Кроме того, отсутствует энергетический комплекс вращения и осевой подачи заготовки. Его функции взяли на себя ведущий ролик 1 и поддерживающие ролики 3 и 4. Энергия для вращения и подачи заготовки передается ей через зону обработки (линии контакта с роликами).

Х а р а к т е р с в я з и формообразующего элемента

инструмента с последним звеном его энергетического комплекса определяется жесткостью этой связи вдоль одной или двух осей координат и количеством степеней свободы, которых лишается формообразующий элемент по отношению к его направляющему комплексу. По первому признаку различают жесткое (обычное) и эластичное (с пониженной жесткостью) крепления формообразующего элемента. Примером обработки с эластичным креплением формообразующих элементов является ленточное шлифование, один из способов которого показан на рис. 2.6. Эластичность ленты 2, покрытой абразивными зернами, позволяет ей принимать в зоне контакта форму фрагмента обрабатываемой поверхности заготовки 1. При этом нагрузка более или менее равномерно распределяется между абразивными зернами, находящимися в зоне обработки.

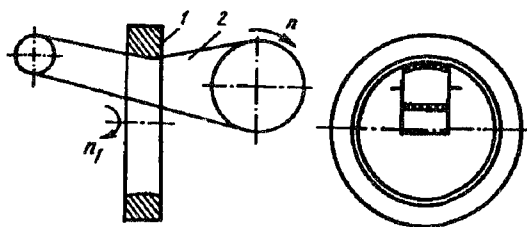


Рис. 2.6. Схема ленточного шлифования

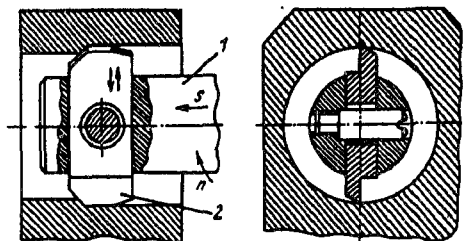


Рис. 2.7. Схема обработки плавающим двухлезвийным блоком

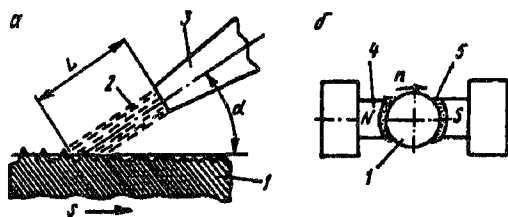


Рис. 2.8. Схемы обработки свободным абразивом

По второму признаку различают обработку закрепленным инструментом, обработку инструментом с одной или двумя степенями свободы (самоустанавливающимся); обработку «свободным» (т. е. незакрепленным) инструментом (чаще всего это абразивные зерна). Пример обработки отверстия самоустанавливающимся (плавающим) двухлезвийным блоком 1 показан на рис. 2.7. В данном случае формообразующие элементы 2 инструмента имеют одну степень свободы по отношению к направляющему комплексу оправки, что позволяет им самоустанавливаться по предварительно обработанному отверстию. Примеры обработки свободным абразивом показаны на рис. 2.8. Обработка в струе жидкости (рис. 2.8, а) применяется для поверх-

ностей особо сложной конфигурации. Поверхность обрабатываемой заготовки 1 подвергается воздействию струи жидкости 2, содержащей абразивные частицы. Струя жидкости подается из сопла 3 под углом α (чаще всего 40°). При магнитоабразивном полировании (рис. 2.8, б) в зазор между полюсами электромагнита 4 подается порошок 5, обладающий магнитными и абразивными свойствами. Магнитное поле удерживает (временно) эти частицы и прижимает их к обрабатываемой поверхности заготовки 1.

По динамике процесса формообразования различают три вида обработки: предварительную (черновую), чистовую и отделочную. Цель *предварительной обработки* — приблизить форму обрабатываемой поверхности к заданной. При *чистовой* и *отделочной обработке* достигаются заданные параметры качества обрабатываемой поверхности. Однако рационально по возможности использовать так называемую *интеграцию обработки*, т. е. сразу, без предварительной обработки получать заданные точность и шероховатость. Такая однократная обработка возможна как лезвийным, так и абразивным инструментом, но она предъявляет повышенные требования к жесткости и виброустойчивости технологического оборудования и оснастки, требует значительного повышения мощности привода.

Обычные методы обработки характеризуются одним видом подводимой энергии, одним способом ее подвода, а также одним способом воздействия на заготовку. Комбинированные методы обработки могут быть осуществлены путем подвода в зону обработки двух и более видов энергии или путем совмещения различных способов ее подвода. Комбинированные методы обработки классифицируются по следующим признакам: 1) последовательность совмещения видов энергии, способов ее подвода или способов воздействия на заготовку; 2) число совмещаемых видов энергии, способов ее подвода или способов воздействия на заготовку. По первому признаку комбинированные методы делятся на *последовательные* и *параллельные*, а по второму — на три группы: 1) используется один вид энергии, но два разных способа подвода; 2) совмещаются два вида энергии, подводимой в зону обработки; 3) совмещаются три вида энергии или два вида энергии и два способа ее подвода в зону обработки. Примеры комбинированных методов показаны на рис. 2.9.

На рис. 2.9, а приведена схема комбинированного точения заготовки 2 с поверхностным пластическим деформированием (ППД) обработанной поверхности подпружиненным роликом 1. Таким образом совмещаются два метода воздействия на заготовку. Кроме того, для повышения стойкости резца ему сообщаются ультразвуковые колебания, параллельные скорости резания. Следовательно, в данном случае совмещаются еще два способа подвода механической

энергии к зоне обработки.

На рис. 2.9, б показана схема протягивания отверстия комбинированной протяжкой, у которой каждая секция состоит из деформирующего элемента 4 и режущих зубьев 3. Это один из способов обработки резанием с опережающим пластическим деформированием (ОПД) срезаемого слоя, благодаря чему повышается стойкость инструмента и улучшается качество обработанной поверхности.

На рис. 2.9, в приведена схема одного из способов плазменно-механической обработки (ПМО). В данном случае на заготовку 2 (на поверхность резания впереди резца 5) воздействует дуга плазмы б, которая формируется в среде аргона и водорода при проходе через электрическую дугу, горящую между корпусом плазмотрона 7 и вольфрамовым электродом. Манипулятор 8 обеспечивает заданное опережение пятна разогрева 9 срезаемого слоя.

При предварительном точении труднообрабатываемых материалов ПМО обеспечивает повышение производительности в 5...12 раз. При ПМО в зону обработки подводится два вида энергии — механическая и тепловая. Срезаемый слой подогревается до 600...900 °С, а в некоторых случаях частично расплавляется.

На рис. 2.9, г дана схема комбинированного механоэлектрохимического кольцевого сверления твердосплавной заготовки 2 кольцевым сверлом 10 с алмазносным рабочим кольцом 11. При этом, кроме вращения с частотой n и осевого прижима с силой P , сверлу сообщаются ультразвуковые колебания с амплитудой $A = 5...15$ мкм. Сверло и заготовка подключены к источнику постоянного тока, а внутрь сверла под давлением подается электролит (расход 3 л/мин), благодаря чему механическая обработка совмещается с электрохимическим растворением. Алмазносный слой инструмента имеет каналы для подвода электролита в торцовый межэлектродный зазор и удаления из него продуктов разрушения. Данный процесс в 13 раз производительнее обычного алмазного сверления.

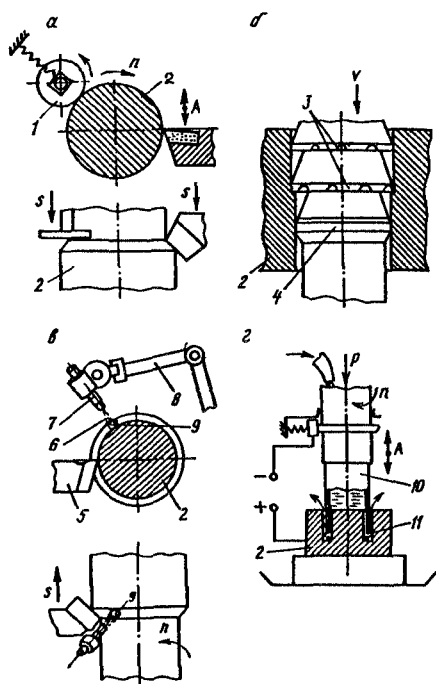


Рис. 2.9. Схемы комбинированных методов обработки

Любой из методов обработки используется в определенном диапазоне показателей, обусловленном свойствами материала заготовки и инструмента. Критическими называют такие условия, когда дальнейшее повышение уровня показателей свойств обрабатываемого материала делает его использование невозможным по техническим причинам или нерентабельным по экономическим соображениям. Например, условия обработки инструментом из быстрорежущей стали становятся критическими, когда твердость обрабатываемого материала приближается к 46...51 HRC₃. В подобных ситуациях выходом из положения часто является комбинирование методов обработки.

Традиционными и чаще всего используемыми в машиностроении являются механические способы обработки с частичным удалением или перераспределением материала заготовки. Инструмент, оборудование и движения формообразования этих способов подробно освещены в курсах «Основы проектирования режущего инструмента» и «Металлорежущие станки и промышленные роботы». Поэтому в дальнейшем при описании традиционных способов обработки деталей машин главное внимание будет обращать на их технологические возможности.

2.3. Стругание и долбление

Стругание применяется для обработки плоских открытых поверхностей (плоскости, пазы, направляющие и т. д.) на строгальных станках с помощью строгальных резцов. На станках, снабженных копировальным устройством, можно обрабатывать линейчатые фасонные поверхности. Главное возвратно-поступательное движение в зависимости от типа станка может совершать резец (поперечно-строгальные станки) или заготовка (продольно-строгальные станки). Во время обратного хода стружка не снимается, а резец приподнимается над обработанной поверхностью, чтобы предотвратить его изнашивание от трения задней грани по поверхности резания. Движения подачи также совершаются или резцом, или заготовкой. Резец устанавливается в суппорте (на продольно-строгальных станках имеются два-четыре суппорта), а заготовка — на столе в универсальном или специальном приспособлении.

Долбление чаще всего применяют для обработки окон и различных пазов в отверстиях с помощью долбежных резцов. Благодаря наличию подач трех направлений (продольной, поперечной и круговой), которые обычно совершает заготовка, закрепленная на столе долбежного станка, долблением можно обрабатывать сложные контуры, состоящие из отрезков прямых линий и дуг.

Табл. 2.1. Показатели качества обработки строганием и долблением в зависимости от динамики процесса

Вид обработки	Квалитет точности размера	Параметр шероховатости Ra , мкм	Погрешность формы и расположения, мкм/100 мм		
			Неплоскостность	Непараллельность	Неперпендикулярность
Предварительная	11...13	12,5...25	20...60	12...50	20...60
Чистовая	9...11	2,5...6,3	4...20	5...12	6...20
Отделочная	6...9	0,6...1,3	2...4	3...5	3...6

К достоинствам строгания и долбления следует отнести их универсальность, низкую стоимость и простоту режущего инструмента. Однако присущее им главное возвратно-поступательное движение с холостой составляющей снижает производительность по сравнению с возможностью инструментального материала. Показатели качества обработки строганием и долблением приведены в табл. 2.1, а типовые режимы обработки на строгальных и долбежных станках — в табл. 2.2. Эти данные можно использовать для ориентировочной оценки производительности процессов формообразования при строгании и долблении.

Табл. 2.2. Типовые режимы обработки при строгании и долблении

Характер обработки	Параметры режима резания	Станок		
		долбежный	поперечно-строгальный	продольно-строгальный
Предварительная обработка плоскостей	t , мм	2...6	3...10	8...20
	s , мм	0,3...1,5	0,3...2	0,6...3,5
	v , м/мин	20...40	20...40	20...40
Предварительная обработка пазов	s , мм	0,1...0,3	0,15...0,3	0,3...0,6
	v , м/мин	8...16	12...18	12...18
Чистовая обработка плоскостей	t , мм	1...2	1...2	2...3
	s , мм	0,3...1	0,3...1	0,6...2
	v , м/мин	30...60	40...80	16...35

2.4. Точение

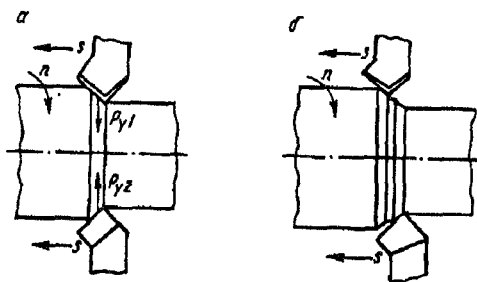
Точение применяется для обработки преимущественно поверхностей вращения (см. рис. 1.5), а также резьб и червяков (см. рис. 1.6) с помощью резцов. Обработка наружных поверхностей вращения называется *обтачиванием*, обработка внутренних поверхностей вращения — *расточиванием*, обработка канавок — *прорезанием*, обработка торцов — *подрезанием*, а обработка резьб — *нарезанием*. В зависимости от типа обрабатываемой поверхности используют различные типы универсальных или специальных резцов. Чаще всего главное вращательное движение сообщается заготовке, которая устанавливается в центрах, в самоцентрирующем патроне, в патроне и центре, в специальном или специализированном приспособлении, которое крепится к шпинделю станка, а движения подачи — резцу. Если станок снабжен соответствующей системой управления подачами (ЧПУ или копирования), то продольное точение (обтачивание и растачивание) позволяет обрабатывать любую комбинацию типовых поверхностей, особенно если их размеры изменяются монотонно.

При растачивании на расточных станках главным является вращательное движение оправки с резцом. Движение продольной подачи сообщается оправке с резцом либо заготовке, которая закреплена на столе. При этом можно обрабатывать только цилиндрические поверхности. Если длина фасонной поверхности не превышает 0,3 диаметра, то ее можно обрабатывать поперечным точением с помощью фасонного резца.

Точению присущи следующие недостатки: 1) изгиб обрабатываемой заготовки под действием односторонней силы резания приводит к искажению формы обрабатываемой поверхности, а в некоторых случаях — к потере устойчивости процесса резания (автоколебаниям); 2) при точении стальных заготовок на высоких скоростях резания получается раскаленная сливная стружка, которая намотывается на инструмент, загромождает рабочее пространство и представляет серьезную угрозу для рабочего; 3) режущая часть резца во время точения непрерывно находится в зоне воздействия больших сил и высокой температуры, что существенно снижает его стойкость и ограничивает скорость резания.

При точении длинных цилиндрических поверхностей первый недостаток компенсируется многорезцовым точением (рис. 2.10), когда радиальные силы резания P_{y1} и P_{y2} уравниваются. Настроить резцы для многорезцового точения с делением подачи значительно труднее, чем для точения с делением глубины резания, так как в первом случае главные режущие кромки должны располагаться на одном конусе, соосном обрабатываемой поверхности, а

Рис. 2 10. Схемы многолезцового точения с делением подачи (а) и глубины резания (б)



вершины обоих резцов должны находиться на одинаковом расстоянии от оси вращения. Во втором случае требования к точности расположения резца, удаляющего верхнюю часть припуска, невысоки. Наиболее часто применяется многолезцовое растачивание.

Второй недостаток точения компенсируется использованием различных способов стружколомания. Их можно разбить на две группы. В первом случае дробление стружки достигается за счет создания определенных условий стружкообразования, а именно: выбора сочетания значений параметров режима резания и заточки инструмента; установления на пути сбегавшей стружки преград в виде лунок, стружколомательных порошков или накладных стружколомателей. Во втором случае (кинематические способы) дробление стружки происходит за счет периодического прерывания процесса резания путем наложения на движение подачи колебательного движения, параллельного направляющей обрабатываемой поверхности. Способы данной группы более универсальны, так как позволяют дробить стружку в широком диапазоне условий. Амплитуда колебаний должна превышать $(0,7...0,8)s$ и слабо зависит от глубины резания и угла в плане. Частота колебаний f зависит от требуемой длины $L_{стр}$ элементов стружки (обычно 60...100 мм) и частоты n вращения шпинделя:

$$f = \pi dn / L_{стр},$$

где d — диаметр обработанной поверхности. При этом отношение f/n следует выдерживать близким к одному из чисел следующего ряда: 1,5; 2,5; ... ; $1,5 + i$, где i — целое число. В противном случае существенно ухудшаются параметры шероховатости поверхности. В общем случае при увеличении амплитуды колебаний возрастают значения параметров Ra и Rz . Эксперименты показали, что при использовании кинематического дробления стружки стойкость резцов повышается в среднем на 40%. К недостаткам кинематического дробления стружки следует отнести значительные колебания значений неуравновешенных сил резания и необходимость специального привода колебательного движения подачи.

Третий недостаток точения компенсируется применением рота-

ционного способа, т. е. точения вращающимся резцом с круговой режущей кромкой. В данном случае активный участок режущего лезвия непрерывно обновляется и резко снижается скорость скольжения стружки и поверхности резания по поверхностям режущего клина инструмента. Ротационные резцы могут вращаться принудительно или от сил трения между инструментом и стружкой (самовращение). Однако таким способом можно обрабатывать только поверхности с плавно изменяющейся образующей.

Показатели качества обработки точением приведены в табл. 2.3, точность расположения осей отверстий после растачивания — в табл. 2.4, а типовые параметры режима точения — в табл. 2.5.

При обработке конических и торцовых поверхностей приведенные в табл. 2.5 данные относятся к максимальному диаметру. Обработка этих поверхностей с постоянной частотой вращения заготовки ведет к недоиспользованию возможностей материала инструмента и, следовательно, к снижению производительности. Точение конических и торцовых поверхностей с большой разницей между максимальным и минимальным диаметрами экономически целесообразно проводить с постоянной скоростью резания, т. е. при уменьшении диаметра частота вращения заготовки должна увеличиваться.

Табл. 2.3. Показатели качества обработки при точении

Способ и вид обработки	Квалитет точности размера	Параметр шероховатости Ra , мкм	Степень точности формы
Обтачивание:			
предварительное	12...14	25...50	10...17
получистовое или однократное	11...13	6,3...25	9...11
чистовое	8...10	2,5...12,5	6...8
тонкое	6...9	0,63...1,25	5,6
Растачивание:			
предварительное	11...13	12,5...25	9...11
чистовое	8...10	2,5...6,3	6...8
тонкое	5...7	0,32...1,25	4...6
Подрезание:			
предварительное	14, 15	25...50	10, 11
чистовое	10...13	6,3...25	9, 10
тонкое	8...10	0,63...2,5	6...8

Табл. 2.4. Погрешности расположения осей отверстий после растачивания

Тип станка	Метод координации инструмента	Погрешность расстояния, мкм	Неперпендикулярность на длине 100 мм, мкм
Горизонтально-расточной	По шкале с нониусом	200...400	—
	По концевым мерам	50...100	—
	По индикаторному упору	40...80	—
	С помощью ЧПУ	25...60	40...100
	Поворот и выверка заготовки	—	50...100
	Поворот стола	—	60...300
Координатно-расточной	По шкале оптической линейки	5...20	—
	Поворот стола	—	10...40
Алмазно-расточной	По направляющим силовых головок	10...50	20...60
Агрегатные	С направлением оправок	25...70	50...100
	Без направления оправок	50...100	70...140

Табл. 2.5. Типовые режимы точения

Вид обработки	Параметры режима	Способ обработки			
		Продольное обтачивание	Продольное растачивание	Фасонное поперечное точение	
Предварительная и однократная	t , мм	2...8	2...6	—	
	s , мм/об	0,5...1,2	0,2...0,8	0,03...0,09	
	v , м/мин	150	150	50	
Чистовая:	$Ra = 12,5$ мкм	t	1...2	0,8...1,6	—
		s	0,4...0,6	0,25...0,4	—
	$Ra = 6,3$ мкм	t	0,4...1	0,3...0,8	—
		s	0,25...0,4	0,15...0,25	—
	$Ra = 2,5$ мкм	t	0,1...0,3	0,1...0,25	—
		s	0,1...0,2	0,08...0,15	—
v		190	190	—	
Тонкая	t	0,03...0,1	0,03...0,05	—	
	s	0,08...0,12	0,08...0,12	—	
	v_1	150...250	120...200	—	
	v_2	300...500	300...400	—	

Примечание. Скорость резания при материале режущей части резца: v_1 — для ТЗ0К4; v_2 — для алмаза.

2.5. Сверление

Сверление применяется для формообразования цилиндрических отверстий в сплошном материале. Если в результате обработки сверлом увеличивается диаметр предварительно полученного в заготовке отверстия, то процесс называется *рассверливанием*. Самым распространенным способом обычного (неглубокого) сверления является обработка спиральным сверлом. Но этот способ сверления можно успешно применять, только если длина обрабатываемого отверстия не превышает 3...5 диаметров. Сверление спиральными сверлами осуществляется на сверлильных, токарных, расточных, многоцелевых и агрегатных станках. На этих станках возможны следующие сочетания абсолютных движений инструмента и заготовки: 1) сверло вращается и совершает осевую подачу; 2) заготовка вращается, а сверло совершает осевую подачу; 3) заготовка и сверло вращаются, осевую подачу совершает сверло.

При сверлении распространенной погрешностью является так называемый *увод сверла*, т. е. смещение и перекося оси обработанного отверстия по отношению к оси вращения шпинделя станка. *Удельный увод сверла* $\Delta_{уд}$ (на 1 мм длины отверстия) и начальное смещение C_0 можно оценить с помощью следующих эмпирических уравнений:

$$\Delta_{уд} = 0,66 + 2,06 \exp(-0,09 d); C_0 = 5 \sqrt{d},$$

где d — диаметр сверла.

Полный увод Δ сверла можно определить так:

$$\Delta = \sqrt{(L \Delta_{уд})^2 + C_0^2},$$

где L — длина сверления.

Для уменьшения увода сверла при обработке на сверлильных и агрегатных станках применяют направляющие (кондукторные) втулки, а при сверлении на револьверных станках и автоматах, на обрабатываемых центрах рекомендуется проводить предварительную зацентровку отверстия коротким и жестким сверлом с углом в плане 90° . Увод спирального сверла существенно зависит от биения его режущих кромок и смещения лезвия перемычки. При вращении заготовки увод меньше, чем при вращении сверла. В этом случае биение режущих кромок сверла приводит к разбивке (увеличению диаметра) отверстия.

При сверлении отверстий большого диаметра часто применяются сверла для кольцевого сверления. Затраты энергии при кольцевом сверлении существенно ниже, чем при обычном.

Одна из главных проблем, с которой приходится сталкиваться при сверлении, — это удаление стружки из зоны резания и подача в эту зону *смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ)*. При свер-

лении отверстия, длина которого больше 3...5 диаметров, приходится прерывать процесс и выводить сверло из отверстия для очистки от стружки, смазывания и охлаждения. Чем больше относительная глубина сверления, тем затруднительнее отвод стружки из зоны резания.

Для глубокого сверления отверстий относительно небольшого диаметра часто применяются спиральные сверла шнекового типа, отличающиеся от обычных спиральных сверл более крутым углом подъема стружкоотводящих канавок (50...60°). Но и шнековые сверла не гарантируют от возможного заклинивания удаляемой стружки. Поэтому для глубокого сверления применяются специальный инструмент, оснастка и оборудование, обеспечивающие непрерывный процесс сверления и принудительный отвод стружки.

Для глубокого сверления применяются одно- или многокромочные сверла с внутренним либо наружным отводом стружки. Наиболее распространенным является внутренний отвод стружки, т. е. отвод через отверстие в сверле, так как он обеспечивает более высокое качество поверхности просверленного отверстия. Но сверла с внутренним отводом стружки изготавливаются, как правило, диаметром более 35 мм. При меньших размерах трудно конструктивно обеспечить надежный внутренний отвод стружки.

Самым простым и распространенным является однокромочное сверло с внутренним отводом стружки. Недостаток таких сверл — повышенное давление на направляющие и, как следствие, их повышенный износ. При обработке отверстий диаметром более 50 мм однокромочным сверлом направляющие перегружаются, особенно нижняя, находящаяся под режущей пластиной. Поэтому в таких случаях лучше применять многокромочные сверла. Однокромочное и правильно спроектированные двух- и трехкромочные сверла обладают определенностью базирования, что обеспечивает плавность их работы (без вибраций), отсутствие огранки и малую шероховатость поверхности просверленного отверстия.

Глубокое сверление осуществляется на специальных (или модернизированных для этой цели) станках, обычно токарного типа, оснащенных устройством для подачи СОЖ в зону резания под большим давлением, устройствами транспортирования стружки из

Количество СОЖ Q и давление p , под которым она подается в зону резания, зависят от диаметра обрабатываемого отверстия. При сверлении однокромочным сверлом с увеличением диаметра от 20 до 200 мм требуемый расход СОЖ изменяется (линейно) от 500 до 7500 л/мин, а требуемое давление уменьшается от 4,5 до 1,5 МПа. При сверлении двухкромочным сверлом расход СОЖ следует увеличить на 20%.

Эффективность глубокого сверления обычными спиральными и шнековыми сверлами значительно повышается при наложении осевых вибраций с амплитудой (0,5...1,5) s и частотой 100...150 Гц.

Табл. 2.6. Точность положения отверстий, связанная с уводом инструмента при сверлении

Показатель точности	Диаметр сверла (отверстия), мм	Обработка на станках		
		сверлильных		агрегатных
		по разметке	по кондуктору	
Общее смещение оси, мм	6...30	0,5...1	0,1...0,3	—
Неперпендикулярность оси, мм/100 мм	6...30	0,5...1	0,1	—
Смещение оси относительно кондукторной втулки, мм	6...10	—	—	0,13
	10...18	—	—	0,15
	18...30	—	—	0,2
Отклонение межосевого расстояния между отверстиями, мм	6...10	—	—	0,23
	10...18	—	—	0,25
	18...30	—	—	0,35

Значения показателей увода инструмента при сверлении нормальными сверлами и обеспечении отверстий с точностью диаметра 11...13-го квалитетов, точностью формы 10...12-й степеней и шероховатостью поверхности с $Ra = 6,3...25$ мкм приведены в табл. 2.6. Данные соответствуют обработке заготовок из чугуна. При обработке заготовок из алюминиевых сплавов отклонения положения оси следует уменьшать на 25...30%, а при обработке стальных заготовок — увеличивать на 15%. При обработке сверлами точного исполнения смещение осей уменьшается на 10...15%. Средние параметры режима обработки отверстий в стальных заготовках приведены в табл. 2.7. При сверлении чугуна скорость резания сверлами из быстрорежущей стали P6M5 увеличивается на 30...40%.

Табл. 2.7. Средние параметры режима сверления стали

Способ обработки	Параметры			Материал режущей части
	t , мм	s , мм/об	v , м/мин	
Сверление спиральными отверстиями	$0,5d$	$0,012d$	18...30	Сталь Р6М5
		$0,085d$	40...80	Твердый сплав Т15К6
Глубокое сплошное сверление	$0,5d$	$0,0025d$	120...160	Твердый сплав Т15К6
Глубокое кольцевое сверление	$0,15d$	$0,0025d$	160...200	Твердый сплав Т15К6

Примечание. Символ d — диаметр сверла или отверстия, мм.

2.6. Зенкерование и развертывание

Зенкерование применяется для предварительной обработки отлитых или отштампованных отверстий либо для повышения точности и качества поверхности предварительно обработанного (сверлением или зенкерованием) отверстия. Для предотвращения увода оси отверстия при зенкеровании применяется инструмент с направляющей частью (по предварительно обработанному отверстию или кондукторной втулке) или кондукторные втулки, которые направляют инструмент по его рабочей части. Для обработки отверстий диаметром от 35 до 250 мм вместо зенкеров часто применяют двух- или четырехрезцовые блоки. Последние работают по методу деления ширины среза (глубины резания) и могут снимать припуск до 15 мм (рис. 2.11).

Для формообразования конических, ступенчатых или фасонных отверстий применяются перовые (двузубые) зенкеры (рис. 2.12).

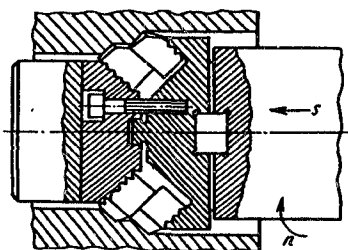


Рис. 2.11. Схема зенкерования отверстия четырехрезцовым блоком

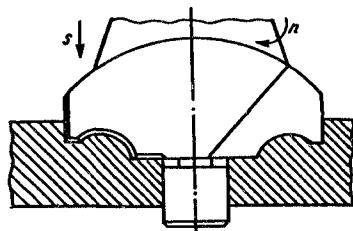


Рис. 2.12. Перовой двузубый зенкер с направлением

Для обработки фасок в отверстиях часто используют зенковки. Цилиндрические углубления и торцовые поверхности (в частности, под головки винтов и под гайки) обрабатываются на сверлильных и агрегатных станках *цекованием*. Цековки выполняются в виде насадных головок с четырьмя или шестью зубьями либо в виде двузубых инструментов. Обычно цековки снабжаются направляющей частью, которая обеспечивает соосность либо перпендикулярность с ранее обработанным отверстием. Зенковки и цековки являются нестандартными зенкерами.

Для получения отверстий высокой точности и малой шероховатости поверхности применяется *развертывание* или непосредственно после сверления (для отверстий относительно малых диаметров), или после чистового зенкерования. При работе чистовыми развертками на токарных и револьверных станках (и автоматах) используются качающиеся оправки (рис. 2.13), которые компенсируют несовпадение оси отверстия, обработанного предварительно другим инструментом, с осью развертки. Это в 1,5...2 раза уменьшает разбивку отверстия по сравнению с жестким креплением многолезвийной развертки. Но такое

развертывание применяется и на

Табл. 2.8. Показатели качества обработки при зенкеровании и развертывании

Характеристика качества отверстия	Способ и вид обработки				Смещение оси отверстия от оси кондукторной втулки при обработке на агрегатных станках				
	Зенкерование		Развертывание		Диаметр отверстия, мм	Зенкер с креплением		Развертка с направлением	
	предварительное	чистовое	нормальное	точное		тонкое	жестким	плавающим	нормальной точности	повышенной точности
Квалитет точности диаметра	11	9	8	7	5	0,10	0,08	—	—
	12	10	9	8	6	0,09	0,08	0,042	0,038
Параметр шероховатости R_a , мкм	12,5	6,3	2,5	1,25	0,63	0,12	0,10	0,047	0,045
	25	12,5	5	2,5	1,25	0,14	0,13	0,052	0,049
Степень точности формы	10	9	8	6	5	—	0,07	0,028	0,026
	11			7		—	0,06	0,018	0,016

Табл. 2.9. Средние режимы зенкерования и развертывания

Способ обработки	Параметры режима			Материал режущей части инструмента
	t , мм	s , мм/об	v , м/мин	
Зенкерование	1...3	0,025 <i>d</i>	15...25	Сталь Р6М5
			40...55	Твердый сплав Т15К6
Развертывание	0,05...0,2	0,06 <i>d</i> 0,02 <i>d</i>	5...10	Сталь Р6М5
			20...50	Твердый сплав Т15К6
Развертывание однолезвийной разверткой	0,1...0,3	0,1...0,5	4...10	Сталь Р6М5

Значения параметров качества обработки при зенкеровании и развертывании приведены в табл. 2.8. Данные относятся к обработке чугуна. При обработке стальных и алюминиевых заготовок смещение отверстий увеличивается на 10...15%. В табл. 2.9 указаны средние режимы обработки отверстий зенкерованием и развертыванием в стальных заготовках. При обработке чугунных заготовок скорость резания увеличивается на 20...30%.

2.7. Фрезерование

Фрезерование — это универсальный способ предварительной и чистовой обработки плоских, зубчатых, винтовых и фасонных поверхностей. Иногда оно используется для формообразования поверхностей вращения. Главное движение со скоростью резания сообщается фрезе, а необходимая комбинация подач — обычно заготовке. При фрезеровании направляющая и образующая генерируются в соответствии со схемами ПП, ПН и ПЕ (см. рис. 2.3).

Чаще всего фрезерование применяется для обработки плоских поверхностей. Открытые плоскости без уступов или с небольшими уступами обрабатываются обычно торцовыми фрезами на консольно- и продольно-фрезерных станках, обрабатывающих центрах, агрегатных станках и т. д.

Для обработки относительно нешироких плоскостей на горизонтально- и продольно-фрезерных станках довольно часто применяют цилиндрические фрезы с винтовым зубом. Направление винтовых зубьев цилиндрических фрез выбирается так, чтобы осевая сила резания была направлена в сторону шпинделя. Рекомендуется при-

менение наборов цилиндрических фрез с разнонаправленными винтовыми зубьями.

Открытые пазы фрезеруются дисковыми трехсторонними или концевыми фрезами, полуоткрытые пазы — концевыми. Т-образные пазы обрабатываются в два этапа: сначала фрезеруется прямоугольный паз, а затем он расфрезеровывается грибковой фрезой. Закрытый паз можно обрабатывать также в два этапа: сначала сверлится отверстие на всю глубину паза для захода концевой фрезы, а затем паз фрезеруется на заданной длине. Кроме того, шпоночные закрытые пазы обрабатываются двузубой концевой фрезой по «челночной» схеме с ручной или автоматической вертикальной подачей s в конце каждого продольного хода. Уступы фрезеруются дисковой двусторонней (открытые) или концевой (чаще полуоткрытые и закрытые) фрезой.

Обработка направляющих типа «ласточкин хвост» осуществляется специальными концевыми или угловыми фрезами. Призматические направляющие фрезеруются набором угловых фрез или фасонной фрезой. Окна обрабатываются обычно концевыми фрезами на фрезерно-копировальных станках или на станках с ЧПУ. При этом желательно, чтобы радиус фрезы был меньше наименьшего радиуса скругления окна.

Спиральные канавки обрабатывают на горизонтально-фрезерных станках угловыми или специальными (фасонными) фрезами. При этом частота вращения заготовки n_3 и ее подача s связаны следующим выражением: $s = n_3 H$, где H — шаг спирали. Профиль спиральной канавки не совпадает с профилем фрезы и зависит от параметров ее наладки: угла φ и смещения торца b , а также от соотношения диаметров фрезы D и заготовки d (рис. 2.14).

Фрезерование применяют также для обработки зубчатых поверхностей. Здесь не рассматривается обработка зубчатых колес, шлицев

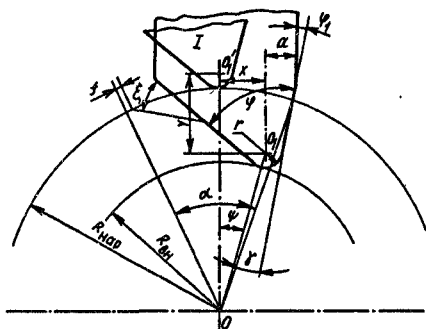
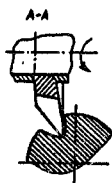
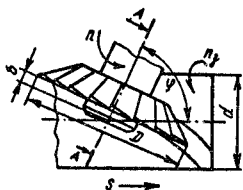


Рис. 2.14. Схема фрезерования спиральной канавки угловой фрезой

Рис. 2.15. Схема настройки для фрезерования впадины храпового колеса

и звездочек. При обработке храповых колес направляющая и образующая впадины (или зуба) генерируются по схеме ПЕ (см. рис. 2.3).

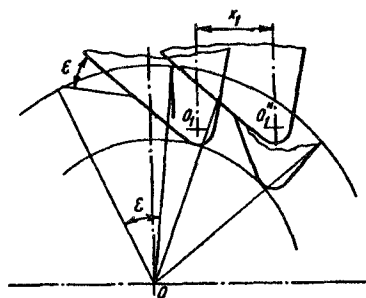


Рис. 2.16. Схема настройки для фрезерования спинки зуба храпового колеса

$$x = (R_{\text{вн}} + r) \sin \psi;$$

$$y = (R_{\text{нар}} + r) - (R_{\text{вн}} + r) \cos \psi,$$

где $\psi = \psi_1 + \varphi_1$; $\sin \psi_1 = (R_{\text{нар}} \sin \gamma - r)/(R_{\text{вн}} + r)$.

Чтобы настроиться на фрезерование спинки зуба, необходимо повернуть заготовку на угол ϵ и сместить фрезу на расстояние x_1 по отношению к положению, которое она занимала при обработке впадины (см. рис. 2.16). Значение x_1 можно определить по формуле

$$x_1 = (A_1 - A_2)/\cos(\varphi - \varphi_1),$$

где $A_1 = (R_{\text{вн}} + r) \sin \lambda - r$; $A_2 = R_{\text{нар}} \cos \tau$; $\lambda = \psi + \gamma - \varphi_1$; $\tau = 360/z + 90 - (\varphi + \gamma + \epsilon) - 180 f/(\pi R_{\text{нар}})$.

Формулы для расчета x_1 , y и x легко получить путем решения треугольников на схемах, приведенных на рис. 2.15 и 2.16.

Показатели качества обработки плоскостей и пазов фрезерованием приведены в табл. 2.10, а типовые параметры режима резания при фрезеровании — в табл. 2.11. Данные режимы относятся к обработке стальных заготовок. При обработке чугуновых заготовок скорость резания следует уменьшать на 15...30%.

Табл. 2.10. Показатели качества обработки фрезерованием

Вид обработки	Квалитет точности размера	Параметр шероховатости Ra , мкм	Погрешность формы и положения, мкм/100 мм		
			Неплоскостность	Непараллельность	Неперпендикулярность
<i>Плоскости</i>					
Предварительная	11...13	12...25	15...50	20...65	20...60
Чистовая	9...11	1,2...6	6...20	4...20	5...25
Тонкая	6...9	0,6...1	3...15	2...8	3...10
<i>Пазы или выступы</i>					
Предварительная	11, 12	12...25	15...50	15...60	15...60
Чистовая	9, 10	2...6,3	5...15	5...20	5...25

Табл. 2.11. Типовые параметры режима фрезерования (для стали)

Вид обработки	Параметры инструмента и режима фрезерования	При обработке фрезой				Примечание
		торцевой	цилиндрической	дисковой	концевой	
Предварительная	D , мм	160...250	80...160	150...250	20...40	Режущая часть фрезы из твердого сплава марки Т15К6
	z	8...20	10...16	12...16	4	
	t , мм	4...20	2...10	20...50	3...10	
	s_z , мм/зуб	1...1,5	0,7...1,2	0,5...0,7	0,3...0,5	
	v , м/мин	250	150	200	150	
Чистовая	t	1...2	1...1,5	—	—	Ra , мкм
	s_0 , мм/об	0,4...0,6	0,2...0,3	—	—	2,5
		0,2...0,3	0,1...0,2	—	—	1,25
		0,15	0,06	—	—	0,63
	v , м/мин	300	250	—	—	

Примечание. Символ D — диаметр; z — число зубьев инструмента; s_z — подача на зуб.

2.8. Протягивание

Протягивание применяется в основном для обработки открытых внутренних цилиндрических и зубчатых поверхностей, пазов в отверстиях, окон, а также заменяет фрезерование, строгание и шлифование при обработке наружных поверхностей (плоскостей, фасонных и т. д.). Иногда протягиванием обрабатывают внутренние винтовые зубчатые поверхности, наружные поверхности вращения и зубья цилиндрических и конических колес.

Протягиваемые отверстия обычно предварительно обрабатываются зенкерованием или растачиванием. Поковки с отверстиями можно непосредственно протягивать, однако возможности этого способа ограничиваются мощностью станка, прочностью протяжки и требованиями к точности обработки. В отливках с отверстиями непосредственное протягивание нецелесообразно вследствие большого изнашивания протяжек при работе по литейной корке.

Отверстия протягиваются на горизонтально- и вертикально-протяжных станках для внутреннего протягивания. Как правило, обработку выполняют в виде так называемого «свободного протягивания». При этом заготовка надевается подготовленным отверстием на переднюю направляющую часть протяжки, а в процессе обработки она силами резания прижимается торцом к опорной поверхности приспособления. Если опорный торец заготовки имеет значительную неперпендикулярность к протягиваемому отверстию, то заготовка должна при протягивании опираться на сферическую опору.

Вертикально-протяжные станки занимают в два-три раза меньшую площадь, чем горизонтальные. На них удобнее устанавливать заготовку, есть возможность автоматизировать загрузку. Протяжка при работе лучше смазывается и охлаждается, так как движение СОЖ совпадает с движением протягивания. Кроме того, вес протяжки не влияет на точность протянутого отверстия, а также упрощается захват протяжки патроном. Однако вертикально-протяжные станки дороже горизонтальных и часто требуют использования значительного пространства под полом.

Зубчатые внутренние поверхности, прямые и винтовые, а также пазы в отверстиях протягиваются на том же оборудовании, что и гладкие отверстия. Однако для протягивания шпоночных пазов заготовка насаживается отверстием на направляющий палец, в котором имеется паз для направления протяжки. Если канавка протягивается за несколько проходов, то под протяжку после каждого прохода помещают прокладку соответствующей толщины. При протягивании шлицевых отверстий исходное круглое отверстие может быть получено любым методом, но лучше, для обеспечения высокой точности взаимного расположения шлицев и отверстий, проводить обработку комбинированной круглошлицевой протяжкой.

Протягивание винтовых шлицевых отверстий отличается от протягивания обычных отверстий тем, что в процессе обработки наряду с поступательным движением заготовке (или протяжке) сообщают вращательное движение. Последнее можно обеспечить или самовращением силами резания, или принудительно специальной кинематической цепью. Самовращение применяется при небольших углах наклона винтовой линии (до 10°) и невысоких требованиях к точности шага. Оно обеспечивается применением упорного шарикоподшипника в опоре заготовки. Принудительное вращение, кроме кинематической цепи, может осуществляться с помощью направляющих пальцев, копирных линеек и т. д.

Иногда для обработки внутренних цилиндрических или зубчатых поверхностей вместо протягивания применяется *прошивание*. Прошивка выполняется обычно длиной не более 15 диаметров. Для реализации процесса не требуется специальное оборудование, а можно приспособить механический или гидравлический пресс, чтобы проталкивать прошивку сверху вниз через подготовленное отверстие. К достоинствам прошивания относятся: простота наладки и обслуживания, отсутствие соединения инструмента с технологическим оборудованием, универсальность и большая возможность автоматизации.

Наружное протягивание является высокопроизводительным и точным способом обработки плоских и фасонных поверхностей. Оно всегда «несвободное», т. е. заготовку закрепляют в приспособлении, а протяжка имеет жесткое направление. Такое протягивание называют еще *координатным*. Чаще всего оно выполняется на вертикально-протяжных станках, где рабочее движение совершает протяжка. Однако встречаются случаи протягивания на горизонтально-протяжных станках с неподвижной протяжкой, где рабочее движение совершает заготовка. Это облегчает автоматизацию процесса, а протяжной станок удобнее вписывать в автоматическую линию. Наружно-конвейерное протягивание значительно увеличивает производительность по сравнению с вертикальным, так как в данном случае нет холостых ходов каретки с заготовкой и одновременно протягивается несколько заготовок. Для наружного протягивания сложных контуров применяются специальные сборные протяжки.

Производительность протягивания и длина протягиваемой поверхности ограничиваются объемом канавок для размещения стружки и необходимостью ее удаления, что в обычных условиях возможно только во время холостого хода. Поэтому перспективными являются протяжки со свободным выходом стружки. Такая наружная протяжка показана на рис. 2.17, а. Она имеет вставные зубья в виде пластин, которые боковыми сторонами жестко закреплены в корпусе. Бла-

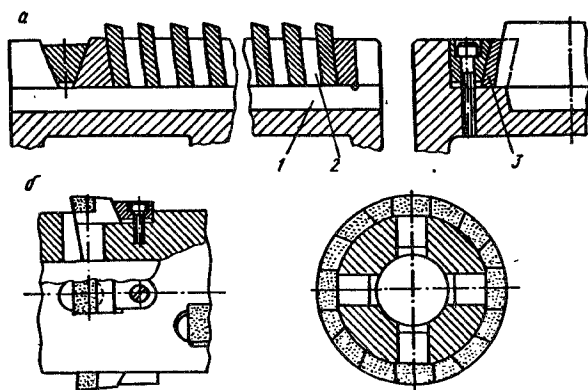


Рис. 2.17. Протяжки со свободным выходом стружки

годаря прокладкам 3, установленным по краям зубьев, между последними образуются сквозные проемы 2, которые сообщаются с продольным пазом 1 в корпусе протяжки. Стружка, срезаемая при протягивании, проходит в проем между зубьями и вымывается СОЖ в паз корпуса, а затем удаляется наружу.

Для обработки глубоких отверстий в чугунных заготовках можно использовать круглую протяжку (рис. 2.17, б), которая имеет зубья, расположенные в шахматном порядке. Перед каждым зубом имеется паз, соединяющийся с общим внутренним каналом корпуса. Через эти пазы и отводится стружка. Благодаря непрерывному отводу стружки такие протяжки могут обрабатывать поверхности большой длины с толщинами среза до 1...1,5 мм.

Табл. 2.12. Показатели качества поверхности после протягивания

Вид протягивания	Квалитет точности размера	Параметр шероховатости R_a , мкм	Степень точности формы
Внутреннее предварительное	10, 11	1,25...3,2	8...10
Внутреннее чистовое	6...9	0,32...1,3	4...8
Наружное однократное	7...10	1,25...6,3	6...8

Параметры качества после протягивания приведены в табл. 2.12, а типовые режимы протягивания стальных заготовок — в табл. 2.13.

Табл. 2.13. Типовые режимы протягивания стали

Параметры режима	Протягивание				
	внутреннее			наружное	
	круглых отверстий	шлицевых отверстий	шпоночных пазов	плоскостей и пазов	фасонных поверхностей
L , мм	0,3...0,8	3...7	3...7	1...3	1...3
s_z , мм	0,02...0,04	0,05...0,1	0,05...0,2	0,1...0,5	0,1...0,3
v , м/мин	6/8	5/8	7/10	7/10	7/10

Примечание. Символ L — припуск; s_z — подача на зуб; значения скорости резания v в числителе относятся к 8-му и 9-му квалитетам точности, а в знаменателе — к 10-му и 11-му. Для достижения более высокой точности и обеспечения значений параметра шероховатости $Ra = 0,32...0,63$ мкм принимается $v = 2...3$ м/мин.

2.9. Шлифование

2.9.1. Виды и способы шлифования

Шлифованием обрабатывают поверхности всех классов. Обычно оно применяется для повышения точности размеров и формы поверхностей, формообразование которых было на предыдущих этапах обработки осуществлено другими способами (точением, фрезерованием и т. д.). Чаще всего шлифуемые заготовки после предварительной обработки подвергаются закалке или химико-термической обработке. В зависимости от требований к точности шлифование может быть *предварительным, чистовым* или *тонким*.

В последнее время шлифование все чаще используется для формообразования, т. е. для снятия значительных слоев материала с заготовки (в этом случае оно называется *силовым*) или для получения в сплошном материале канавок различной формы (*глубинное шлифование*). Шлифование выполняется шлифовальными кругами, состоящими из абразивных зерен, которые жестко сцементированы в пористое тело с помощью связки.

Для обработки поверхностей вращения применяются различные способы *круглого шлифования*. Относительно короткие (менее 80 мм) наружные поверхности вращения обрабатываются *круглым наружным врезным шлифованием* на круглошлифовальных станках. Заготовка при этом устанавливается в центрах, на оправке или в патроне. Одновременное шлифование шейки и торца выполняют на торцекруглошлифовальных станках с наклоном оси вращения круга на угол $8...20^\circ$. Торец и шейку можно шлифовать и на обычном круглошлифовальном станке, применяя круг с поднутре-

нием на торце. Фасонные поверхности вращения шлифуются профилированным кругом.

Для обработки цилиндрических или конических поверхностей значительной длины применяется *круглое наружное шлифование с продольной подачей*. В зависимости от жесткости заготовки (отношения ее диаметра к длине) применяется *многопроходное* или *глубинное шлифование*. При многопроходном шлифовании поперечная подача осуществляется или перед каждым продольным ходом стола с заготовкой, или перед двойным ходом. При глубинном шлифовании заданный слой t снимается за один ход стола.

При обработке внутренних поверхностей вращения, как и в случае наружного круглого шлифования, в зависимости от длины шлифуемой поверхности *внутреннее шлифование* может быть *врезным* или осуществляться с *продольной подачей*. Чаще всего используется многопроходное внутреннее шлифование с продольной подачей, но встречаются и случаи глубинного шлифования. В зависимости от массы, габаритов и формы заготовки при внутреннем шлифовании инструмент имеет либо только продольную и радиальную подачи, либо круговую (вокруг оси шлифуемого отверстия) и радиальную. В последнем случае шлифование называют *планетарным*.

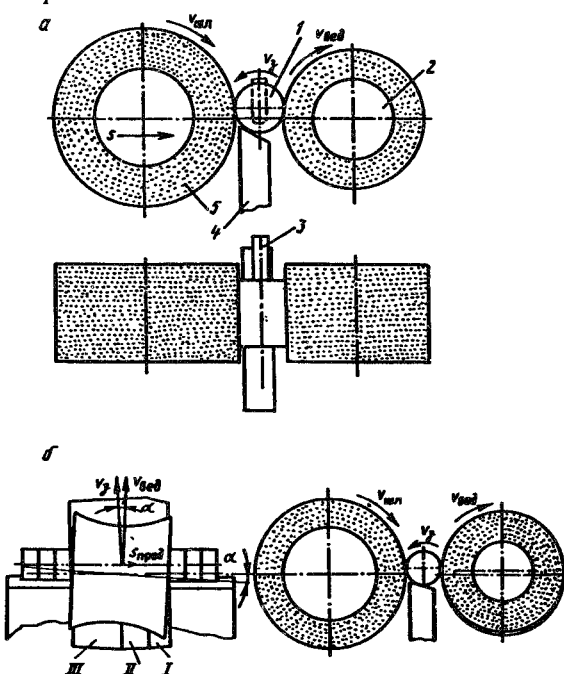


Рис. 2.18. Схемы круглого бесцентрового шлифования: а — врезного; б — на проход

Разновидностью круглого шлифования является *круглое бесцентровое шлифование*, отличающееся высокой производительностью. Особенность этого способа — ориентация заготовки. В данном случае заготовка ориентируется в зоне шлифования той же поверхностью, которая шлифуется, т. е. часть функций направляющего комплекса станка передана заготовке. Основные схемы круглого бесцентрового шлифования показаны на рис. 2.18. При врезном бесцентровом шлифовании (рис. 2.18, а) заготовка шлифуемой поверхно-

стью опирается на опорный нож 4 и ведущий круг 2, который чаще всего тоже является абразивным, но с характеристиками, отличными от характеристик шлифовального круга 5. Своей торцевой поверхностью заготовка 1 контактирует с упором 3. Ведущий круг может быть алюминиевым, стальным или чугунным. Скорость вращения заготовки v_3 обусловлена скоростью вращения $v_{\text{вед}}$ ведущего круга 2 и очень близка к ней. Поперечная подача s может сообщаться как шлифовальному, так и ведущему кругу. В конце цикла шлифования со скоростью $v_{\text{шл}}$ шлифовальный (или ведущий) круг отводится и упор-выталкиватель 3 выталкивает готовую деталь из зоны обработки. Кроме цилиндрических поверхностей, врезным бесцентровым шлифованием обрабатывают также ступенчатые, конические и фасонные поверхности.

Гладкие цилиндрические заготовки (оси, кольца) с высокой производительностью шлифуются бесцентровым шлифованием на проход (рис. 2.18, б). Чтобы в процессе шлифования сообщить заготовке осевую подачу, ось ведущего круга наклоняют в вертикальной плоскости на угол α . Скорость продольной подачи зависит от скорости ведущего круга $v_{\text{вед}}$ и угла α . Вектор скорости ведущего круга в точке его касания с заготовкой раскладывается на две составляющие — вектор скорости вращения заготовки v_3 и вектор продольной подачи $s_{\text{прод}}$. Тогда:

$$v_3 = v_{\text{вед}} \cos \alpha; \quad s_{\text{прод}} = v_{\text{вед}} \sin \alpha.$$

При шлифовании способом на проход оси шлифовального и ведущего кругов все время находятся на одинаковом расстоянии друг от друга. Заготовки, проходя между ними по опорному ножу, шлифуются в заданный размер. Для этого на шлифовальном круге предусматриваются три части: заборная (для съема основной части припуска), калибрующая (для зачистки), обратный конус (для обеспечения плавности выхода заготовки из зоны шлифования).

Фасонное врезное круглое шлифование в последнее время (в условиях массового производства) все чаще заменяется *шлифованием на жестких опорах*, при котором исключается влияние биения шпинделя заготовки и деформаций при ее закреплении на точность формы и относительного положения шлифованной поверхности. Кроме того, данный способ существенно упрощает автоматизацию загрузки заготовок по сравнению с ее креплением в патроне.

На рис. 2.19 показана схема бесцентрового шлифования желоба внутреннего кольца шарикоподшипника на жестких опорах. Заготовка 3 в процессе шлифования шлифовальным профилированным кругом 4, перемещаемым с подачей s , своей шлифуемой поверх-

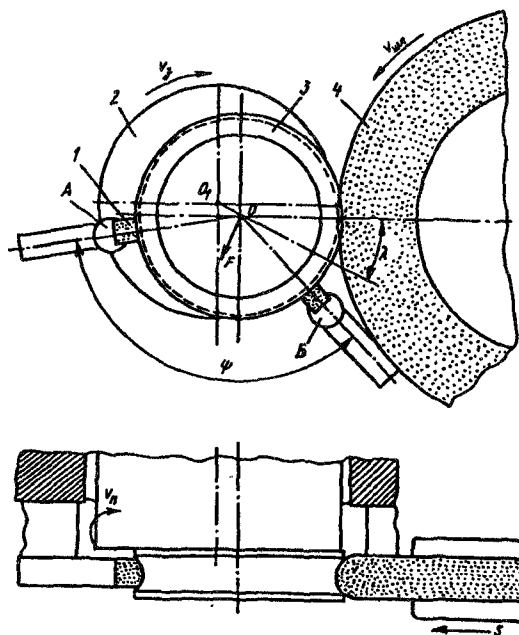


Рис. 2.19. Схема круглого бесцентрового шлифования на жестких опорах (v_n — скорость вращения планшайбы)

центров O_1O , направленном под углом λ к линии центров заготовка — шлифовальный круг, возникает составляющая силы трения F между заготовкой и ведущей планшайбой, которая действует перпендикулярно к линии O_1O и прижимает заготовку шлифуемой поверхностью к опорам.

Относительно неширокие плоскости и пазы обрабатываются плоским врезным (многопроходным или глубинным) шлифованием на плоскошлифовальных станках с прямоугольным столом периферией или торцом круга. При многопроходном шлифовании вертикальная подача s осуществляется перед каждым продольным ходом или перед двойным ходом. Чтобы уменьшить тепловое напряжение в зоне шлифования торцом круга, ось последнего наклоняют в плоскости, параллельной продольной подаче. При предварительном шлифовании допускается превышение задней кромки круга над передней до 2 мм, а при чистовом — не более 0,05 мм.

Для шлифования открытых плоскостей в массовом производстве применяются плоскошлифовальные станки с *круговой* (вместо продольной) *подачей*. Если ширина шлифования больше ширины шлифовального круга, обработка ведется с круговой и поперечной

ностью опирается на две опоры А и В, расположенные под углом ψ друг к другу и жестко закрепленные на суппорте бабки изделия. Эти опоры для уменьшения износа снабжены твердосплавными пластинами 1. В осевом направлении заготовка ориентируется торцом ведущей планшайбы 2, к которому она притягивается вмонтированным в планшайбу электромагнитом.

Постоянный прижим заготовки к неподвижным опорам осуществляется за счет смещения центра ее вращения O относительно оси O_1 вращения планшайбы 2. При смещении

подачами. В этом случае шлифование может быть многопроходным или глубинным. Плоскошлифовальные станки с круглым вращающимся столом более производительны, потому что есть возможность при многопроходном шлифовании в два-три раза по сравнению со станками с прямоугольным столом повысить продольную подачу. Это преимущество особенно проявляется при шлифовании закаленных деталей.

Шлифование шлицевых валов выполняется на шлицешлифовальном станке за один переход одним профилированным кругом либо за несколько переходов, когда боковые стороны и дно шлицев шлифуются отдельно. В первом случае обеспечиваются относительная простота наладки, высокая точность относительного расположения шлицев и высокая стойкость круга. Однако при отдельном шлифовании дна и боковых сторон шлицев снижается производительность процесса шлифования.

2.9.2. Характеристика шлифовальных кругов

Характеристика шлифовальных кругов зависит от состава, свойств, геометрической формы, размеров и уравновешенности инструмента.

Абразивные зерна шлифовальных кругов чаще всего изготавливаются из электрокорунда. В зависимости от содержания примесей и технологии производства электрокорунд делится на следующие виды: нормальный (12А...16А), белый (22А...25А), хромистый

Самой распространенной связкой является керамическая. Она огнеупорна, водостойка, обладает химической стойкостью, жесткостью и относительно высокой прочностью при испытании на разрыв. Инструменты на керамической связке имеют высокую пористость, относительно хорошо отводят тепло, сохраняют профиль рабочей кромки, но чувствительны к ударам и изгибающим нагрузкам. Наиболее часто для инструментов из нормального и белого электрокорунда используются плавящиеся связки на основе борного стекла марок К4 и К5. Для кругов, изготовленных из легированного электрокорунда, применяют связку марки К6 на основе бариевого стекла. Для кругов из карбида кремния используют связки марок К3 и К10. В последнее время для скоростных кругов (скорость шлифования более 80 м/с) начинают применять связку марки К43 на основе литийсодержащего борного стекла с добавкой фтористых соединений.

Бакелитовая связка (марок В1...В3) применяется для шлифовальных кругов, работающих со значительной (переменной) нагрузкой при удалении больших слоев металла. Основой этой связки является бакелит в виде порошка или жидкости. Кроме того, в связку добавляются наполнители — обычно неабразивные материалы, которые активизируют процесс шлифования за счет химического воздействия на обрабатываемый материал, уменьшают нагрев шлифуемой заготовки за счет увеличенной теплопроводности связки, повышают прочность связи абразивных зерен и связки. В качестве наполнителей применяются также вещества, повышающие пористость либо в процессе изготовления (путем растворения или взгонки), либо в процессе шлифования (хрупкие, легковыкрашивающиеся материалы).

Бакелитовая связка обладает высокой прочностью и упругостью, которые, однако, существенно снижаются под действием щелочесодержащих смазочно-охлаждающих жидкостей. Она не выдерживает высоких температур (выше 250 °С).

Для чистового фасонного шлифования, прорезания пазов и отрезания применяются круги на вулканитовой связке (марки В1...В3). Наполнители (смесь каучука с серой), как и в инструментах на бакелитовой связке, вводятся в вулканитовую связку для повышения прочности и других эксплуатационных свойств шлифовальных кругов. При оптимальном содержании наполнителя (10...20 %) прочность связки возрастает в 10...15 раз.

Для эльборовых и алмазных кругов применяются органические, керамические и металлические связки. Для органических связок связующим веществом служат фенолоформальдегидные смолы и комбинации на их основе. Наполнителями в этих связках являются минеральные вещества: карбид бора (В1), белый электрокорунд

(Б3), карбид кремния (Б4), а также железный порошок (Б2). Из керамических наиболее часто используются связки К1 и К5. Круги на этих связках применяются для обработки твердосплавных пластин одновременно со стальной державкой инструмента.

Из широкой номенклатуры металлических связок чаще всего используются связки марок М1, М5, МИ и МК. Основой для большинства металлических связок являются медь и ее сплавы с оловом, алюминием, никелем и другими металлами. В качестве наполнителя в металлических связках МИ и МК служит соответственно карбид кремния зеленый и электрокорунд. Металлические связки удерживают алмазные и эльборовые зерна более прочно, чем органические. Наилучшими режущими свойствами обладают круги на связке М5, а также на новых связках МО13, М5-4, МС6 и др.

Строение круга характеризуется зернистостью и структурой. Номер зернистости выражает размерный параметр абразивных зерен (в сотых долях миллиметра для шлифзерна и шлифпорошка и в микрометрах для микропорошка). Для размерного шлифования чаще всего применяются шлифовальные круги с номерами зернистости 40...16.

Технология дробления и отсева абразивного материала не может обеспечить однородность размерных характеристик абразивных зерен в круге с данным номером зернистости. В любом абразивном инструменте содержатся зерна основной, крупной, мягкой и предельной фракций. В зависимости от содержания основной фракции (размерная характеристика которой соответствует номеру зернистости) выделяют четыре индекса марки шлифовального материала: В — содержание основной фракции 55...60%, П — 45...55, Н — 40...45, Д — 39...41%. Шлифовальные круги с повышенным содержанием основной фракции обладают лучшими эксплуатационными характеристиками. Однако для профильного шлифования и там, где требуется высокая стойкость кромки круга, лучше себя показали шлифовальные круги, изготовленные из смеси зерен двух номеров зернистости: 40 и 25.

Структура шлифовального круга характеризует соотношение объемов, которые занимают в нем абразивные зерна, связка и поры. В любом абразивном инструменте на керамической или бакелитовой связке имеет место соотношение

$$V_{\text{зер}} + V_{\text{св}} + V_{\text{пор}} = 100\% ,$$

где $V_{\text{зер}}$, $V_{\text{св}}$, $V_{\text{пор}}$ — относительные объемы соответственно зерна, связки и пор. Содержание пор в абразивных инструментах на вулканитовой и металлических связках очень мало.

Регулируемая пористость необходима шлифовальному кругу, так

как чем больше относительный объем пор и чем крупнее сами поры, тем эффективнее идет процесс шлифования (особенно труднообрабатываемых материалов). В то же время инструмент с высоким содержанием пор менее прочен и больше изнашивается, чем инструмент более плотный, монолитный. Следует различать пористые круги с естественными порами и круги, поры которых получены благодаря применению выгорающих наполнителей. Последние называются высокопористыми и могут иметь $V_{\text{пор}} = 75\%$.

Номер структуры связывается с относительным объемом зерен. Структуре № 1 соответствует $V_{\text{зер}} = 60\%$. С повышением номера структуры на единицу $V_{\text{зер}}$ уменьшается на 2 %, и так до структуры № 12, где $V_{\text{зер}} = 38\%$. Чаще всего круги на керамической связке изготавливают с номерами структур от 4-го до 9-го, причем по мере уменьшения размера зерен номер структуры повышается. Для чистовой обработки необходимы круги с меньшим номером структуры, чем для предварительной. Для профильного шлифования также следует выбирать круги с меньшим номером структуры.

Структура алмазных и эльборовых шлифовальных кругов характеризуется концентрацией абразивного материала. За 100%-ю концентрацию алмазных зерен принимается содержание 4,39 карата в 1 см^3 алмазного слоя. За 100%-ю концентрацию алмаза или эльбора принимают такое содержание абразивных зерен, которое составляет примерно 25% объема рабочего слоя инструмента, независимо от типа связки. Шлифовальные круги выпускают с концентрацией от 25 до 150%. По специальным заказам можно изготовить круги с концентрацией 175 и 200%.

Твердость шлифовального круга характеризуется прочностью, с которой связка удерживает абразивные зерна, выходящие на рабочую поверхность круга и подвергающиеся ударным нагрузкам в процессе шлифования. Для абразивных инструментов установлена условная шкала твердости, приведенная в табл. 2.14. Цифры 1, 2 и 3 справа от буквенного обозначения характеризуют твердость в порядке ее возрастания. Измерение и оценивание твердости состоит в том, что заданным стандартным способом механического воздействия разрушают небольшой участок поверхности контролируемого инструмента. Количественной оценкой твердости является размер разрушения, т. е. глубина лунки или отпечатка, полученных при испытании. Контроль твердости абразивных инструментов с номером зернистости больше 16 осуществляется на пескоструйном приборе, на котором локальное разрушение производится струей стандартной порции кварцевого песка, выбрасываемого из рабочей камеры прибора сжатым воздухом под давлением 0,15 МПа. Для определения твердости инструмента на керамической или бакелитовой связке

зернистостью № 12 и менее используется прибор Роквелла, на котором под действием стандартной нагрузки в круг вдавливаются шарик диаметром 5 или 10 мм. Прибор ТКН (твердомер конусный с нагревом) используется для определения твердости абразивных кругов на вулканитовой связке.

Табл. 2.14. Твердость абразивного инструмента

Название характеристики шлифовального круга	Условное обозначение характеристики	Степени твердости шлифовальных кругов со связками	
		керамической или бакелитовой	вулканитовой
Мягкий	М	M1, M2, M3	—
Среднемягкий	СМ	СМ1, СМ2	—
Средний	С	С1, С2	С
Среднетвердый	СТ	СТ1, СТ2, СТ3	СТ
Твердый	Т	Т1, Т2	Т
Весьма твердый	ВТ	ВТ1, ВТ2	—

Для оценки твердости абразивного инструмента без его разрушения применяют акустические методы контроля, при которых определяют скорость распространения звука в среде инструмента. Твердость оценивается значением звукового индекса, равным 0,01 скорости звука. Шкала звуковых индексов от 19 до 75 охватывает весь диапазон твердостей, указанный в табл. 2.14.

Твердость является самой существенной характеристикой абразивного инструмента, часто предопределяющей эффективность процесса шлифования. Большое значение имеет также равномерность твердости круга в отдельных его частях. При неравномерной твердости круга его износ тоже неравномерен, что приводит к появлению погрешности формы рабочей поверхности круга, которая переносится на шлифуемую поверхность. Наиболее часто используются круги средней твердости. При выборе степени твердости для конкретных условий шлифования необходимо руководствоваться следующими рекомендациями: 1) при шлифовании периферией круга следует использовать более твердые круги, чем при шлифовании торцом; 2) при бесцентровом, внутреннем и плоском шлифовании необходимо применять более мягкие круги, чем при круглом наружном шлифовании; 3) при профильном шлифовании, резьбошлифовании, шлифовании прерывистых поверхностей и заготовок малых диаметров, точном шлифовании цилиндрических поверхностей, ограниченных галтелями и жестким допуском на радиус, следует использовать более твердые круги; 4) при шлифовании с применением СОЖ надо применять более твердые круги, чем при шлифо-

вании без СОЖ; 5) в случае замены керамической связки бакелитовой, электрокорунда нормального — белым или белого — монокорундом, при уменьшении номера зернистости следует повышать твердость на одну-две степени; 6) для устранения опасности термического повреждения шлифуемой поверхности желательно применять более мягкие круги.

Шлифовальные круги изготавливают трех классов точности: АА, А и Б. Для кругов класса точности АА используют шлифовальный материал с индексами зернистости В и П, класса точности А — только В, П и Н, а для кругов класса Б можно использовать шлифовальный материал с любым содержанием основной фракции. Кроме того, у круга класса АА диаметры посадочного отверстия, наружной цилиндрической поверхности и высота выполняются точнее, чем у круга класса А, а у последнего — точнее, чем у круга класса Б.

Шлифовальные круги различают также по классам уравновешенности. Установлены четыре класса уравновешенности, обозначаемых цифрами 1, 2, 3 и 4. Классу 1 соответствует минимальная, а классу 4 — максимальная неуравновешенность. Допускаемая неуравновешенность для всех классов увеличивается при увеличении массы круга. Для уменьшения неуравновешенности, что имеет большое значение при чистовом и тонком шлифовании, а также при высоких (50...80 м/с) скоростях шлифования, выполняют периодическую балансировку круга (вне станка и на станке). Некоторые методы балансировки освещены в § 3.5. Только в данном случае для устранения неуравновешенности балансировочные грузы фиксируют после устранения дисбаланса. Разработаны и применяются также устройства для автоматической балансировки круга на шпинделе станка.

2.9.3. Правка шлифовальных кругов

При шлифовании вследствие изнашивания изменяется микро- и макрогеометрия рабочей поверхности шлифовального круга, а следовательно, и его эксплуатационные свойства. Для их восстановления шлифовальный круг периодически подвергается правке. Особенно велика роль правки при врезном шлифовании, когда погрешности профиля круга копируются обработанной поверхностью. От правильного выбора средств и режимов правки зависят не только точность и шероховатость, но и производительность обработки, расход шлифовальных кругов и экономическая эффективность процесса шлифования. Широко применяемые шлифовальные круги на керамической связке твердостью СМ2...СТ2 в основном расходуются не в процессе шлифования, где их износ очень мал, а в процессе правки. На правку расходуется от 45 до 80 % полезного

объема абразивных кругов, а затраты времени на правку могут достигать 30% времени обработки.

Способ и режим правки выбирают в зависимости от требований к точности и шероховатости обрабатываемой поверхности. Правку абразивных кругов можно осуществить обтачиванием алмазным инструментом, обкатыванием металлическими, твердосплавными или абразивными дисками, шлифованием кругами из карбида кремния или алмазными роликами (брусками), накатыванием стальными профильными роликами.

Правку обтачиванием (рис. 2.20) выполняют по схеме токарной обработки с продольной $s_{\text{прод}}$ и поперечной $s_{\text{поп}}$ подачами. Этот наиболее точный способ применяют для автоматической и профильной правки, а также при шлифовании по 5-му и 6-му квалитетам точности ($Ra = 0,16 \dots 0,63$ мкм). Правящим инструментом являются: крупные алмазные зерна, зачеканенные в оправки; алмазные резцы; алмазно-металлические карандаши. Наиболее распространены алмазно-металлические карандаши, в которых в определенном порядке размещены кристаллы алмазов, прочно соединенные металлической связкой с державкой.

Наиболее распространены алмазно-металлические карандаши, в которых в определенном порядке размещены кристаллы алмазов, прочно соединенные металлической связкой с державкой.

В зависимости от расположения алмазных кристаллов различают четыре типа алмазно-металлических карандашей: Ц — с алмазами, расположенными цепочкой; С — с алмазами, расположенными по 3...5 шт. слоями, которые могут перекрываться или не перекрываться; Н — с неориентированным расположением алмазов. Каждый тип карандашей подразделяют на марки, различающиеся массой и количеством кристаллов алмаза, а также размерами державки.

В процессе правки алмазно-металлические карандаши изнашиваются (на рабочих поверхностях алмазных зерен образуются площадки). Поэтому карандаши обычно устанавливают так, чтобы их ось была наклонена под углом α в сторону вращения шлифовального круга. Это позволяет, периодически поворачивая карандаш вокруг оси на $40 \dots 60^\circ$, вводить в работу незатупившиеся грани алмаза (восстанавливать задний угол). Такая установка карандашей снижает износ алмаза, предохраняет его от перегрузки и исключает

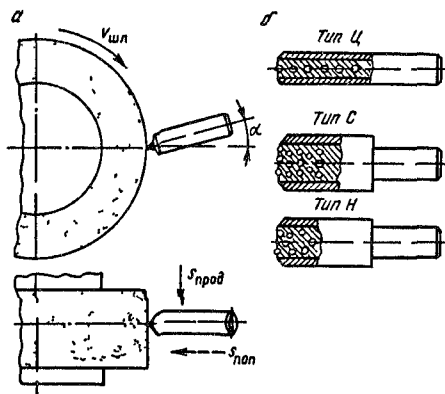


Рис 2.20 Схема правки круга обтачиванием (а) и инструмент (б)

вибрации при правке. Для карандашей типа Ц угол $\alpha = 10...15^\circ$, а для типов С и Н $\alpha = 2...5^\circ$.

Алмазы с естественными гранями, закрепленные в оправках, имеют значительно бóльшую износостойкость по сравнению с алмазнометаллическими карандашами, так как их устанавливают в оправке так, чтобы плоскости сколов кристаллов не совпадали с направлением сил, действующих на алмаз при правке. Для закрепления алмазов в оправках применяют металлический зажим, пайку или чеканку.

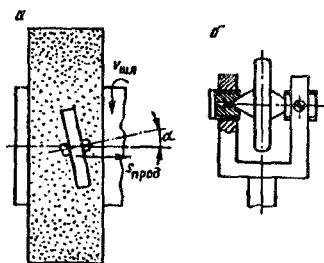


Рис. 2.21. Схема правки круга обкатыванием (а) и инструмент (б)

Правка обкатыванием твердосплавными или абразивными дисками представляет собой процесс дробления и скалывания абразивных зерен и связки на рабочей поверхности круга правящим инструментом, прижатым к вращающемуся шлифовальному кругу с определенной силой и вращающимся в результате действия сил трения. Чаще всего в качестве правящего инструмента при правке обкатыванием (рис. 2.21) применяется монолитный твердосплавный диск, ось которого скрещивается с осью шлифовального круга под углом $\alpha = 5...10^\circ$. Такое расположение оси ролика несколько увеличивает производительность правки, но при этом повышается износ правящего инструмента.

Правку кругов обкатыванием чаще всего применяют как предварительную, когда необходимо снять относительно большой слой абразива. Можно применять такую правку для кругов, используемых при предварительном или получистовом шлифовании с обеспечением $Ra > 1,25$ мкм.

Правка шлифованием представляет собой процесс срезания и дробления абразивных зерен рабочей поверхности шлифовального круга вращающимся правящим инструментом, который получает движение от отдельного привода. В отличие от правки обкатыванием в данном случае на рабочей поверхности шлифовального круга действуют не только радиальные, но и значительные тангенциальные силы. В качестве правящего инструмента чаще всего применяют ролик с алмазносным слоем, который соединен с корпусом специальной твердосплавной связкой. В условиях массового производства применяют алмазные ролики, позволяющие методом врезания править сразу несколько рабочих поверхностей круга, что сокращает затраты времени на правку. Непрерывная врезная правка таким роликом в сочетании с воздействием на рабочую поверхность круга струи СОЖ под высоким давлением в 20...30 раз улучшает режущие свойства шлифовального круга по сравнению с обычной периоди-

ческой правкой. На плоскошлифовальных станках вместо алмазного ролика с отдельным приводом можно для фасонной правки круга применять алмазный фасонный брусок, который устанавливается на столе станка соосно с обрабатываемой заготовкой. Правка шлифованием обеспечивает точность профиля шлифуемой поверхности до 0,01...0,02 мм и значения параметра ее шероховатости $Ra = 0,32...0,63$ мкм. Достижимая точность профиля зависит от точности изготовления алмазных роликов и их биения.

Правка накатыванием рабочей поверхности круга стальными профильными роликами представляет собой процесс дробления абразивных зерен и связки при относительно медленном вращении правящего ролика и прижатого к нему с определенной радиальной силой шлифовального круга. Данный способ применяется исключительно для правки профильных шлифовальных кругов. Профилирование ведут при скорости накатывания 1...1,5 м/с и поперечной подаче 0,05...0,1 мм/мин. Правящий ролик имеет профиль шлифуемой детали. Износ ролика вследствие незначительного проскальзывания при правке сравнительно невелик, поэтому одним и тем же роликом можно править многократно. В зависимости от конструктивных особенностей станка принудительное вращение при накатке сообщают либо шлифовальному кругу, либо ролику.

Круги, заправленные путем накатывания, обладают достаточно высокими режущими свойствами и обеспечивают шлифование с достижением $Ra = 1,25$ мкм. Наличие канавок с неравномерным шагом на ролике интенсифицирует процесс профилирования круга. Для изготовления роликов применяют термически улучшенные стали марок 45 и 40Х или закаленные инструментальные стали (У8А, ХВГ, Р6М5). Хотя закаленные до высокой твердости (62...66 HRC₃) ролики более износостойки, но стоят дороже и для их изготовления требуются оптико-шлифовальные станки.

Режимы правки приведены в табл. 2.15...2.17. Параметры режима правки зависят от требований к шероховатости и способа правки, а число рабочих проходов — от снимаемого слоя и колеблется в пределах от 3 до 8. Кроме того, осуществляется несколько проходов (2...4) без поперечной подачи (выхаживающих).

Алмазные и эльборовые круги с прямолинейной образующей рабочей поверхности правят одним из двух способов — шлифованием или обкатыванием. Шлифование более эффективно для кругов на бакелитовой связке. Высокие режущие свойства круга, который подвергается правке шлифованием, достигаются, когда правящий абразивный круг имеет скорость 20...30 м/с, а подвергаемый правке вращается навстречу со скоростью в 2 раза меньшей. При правке шлифованием правящий абразивный круг изнашивается в 10 раз интенсивнее алмазного. При правке алмазных кругов обкатыванием

расход абразива правящего круга в 1,5 раза меньше, чем при правке шлифованием, но при этом и производительность правки снижается более чем в 3 раза. Для любого способа расход абразива при правке алмазных кругов на металлической связке в 3,5...4 раза выше, чем при правке кругов на органической связке.

Для правки алмазных и эльборовых кругов сложного профиля на металлической связке наиболее рационально применять электроэрозионное или электрохимическое профилирование (правку). Электроэрозионная правка обеспечивает высокую (в 2 раза большую, чем правка шлифованием) режущую способность алмазного круга. К преимуществам электрохимического профилирования по сравнению с электроэрозионным, использующим тепловую энергию разряда, относятся технологическая простота проведения правки и отсутствие побочных вредных влияний на алмазные зерна. Скорость алмазного круга может быть пониженной (5 м/с) или рабочей.

Табл. 2.15. Режим правки кругов обтачиванием

Способ шлифования	Параметр шероховатости обрабатываемой поверхности Ra , мкм	Правка			
		алмазом		алмазно-металлическим карандашом	
		$s_{\text{прод}}$, м/мин	$s_{\text{поп}}$, мм/дв.х	$s_{\text{прод}}$, м/мин	$s_{\text{поп}}$, мм/дв.х
Круглое наружное	0,32...1,25	0,3	0,02	0,4	0,03
Внутреннее	0,32...1,25	1,0	0,02	1,5	0,03
Плоское	0,08...0,32	0,2	0,01	0,3	0,02
Резьбошлифование	0,16...0,63	0,2	0,01	—	—
Профильное	0,16...0,32	0,1	0,01	0,2	0,02
Шлицешлифование	0,16...0,32	0,2	0,01	0,3	0,02

Табл. 2.16. Режим правки кругов обкатыванием

Правящий инструмент	Параметры режима			
	$s_{\text{прод}}$, м/мин	$s_{\text{поп}}$ (мм/ход) для зернистости шлифовального круга		
		40	25	16
Круг с материалом зерен 63С	1	0,03	0,025	0,015
Диск твердосплавный	0,5...1	0,025	0,015	0,015
Диск стальной	1...1,5	0,045	0,015	0,015

Табл. 2.17. Режим правки кругов шлифованием

Правящий инструмент	Вид шлифования	Параметры режима			
		v , м/с	$s_{\text{прод}}$, м/мин	$s_{\text{поп}}$	
				мм/ход	мм/мин
Алмазный ролик	Окончательное	10	0,3...1	0,02	0,3...0,5
Круг с материалом зерен 63С	Предварительное	0,5...1	1...1,5	0,05	—
	Окончательное	0,5...1	0,5...1	0,03	—

2.9.4. Технологические модели и циклы шлифования

Шлифование является сложным процессом, состоящим из взаимосвязанных подпроцессов: удаления материала, упругого деформирования технологической системы, относительного перемещения элементов технологической системы, теплообмена, изнашивания шлифовального круга, макро- и микроформообразования. На следующей ступени классификации каждый из указанных подпроцессов можно в свою очередь разделить на компоненты — более простые элементы процесса. Для эффективного управления процессом шлифования необходимы математические модели, отражающие наиболее важные связи между показателями его компонентов. Каждая модель отражает сложную систему в определенном диапазоне условий и требований, включая только те параметры и отношения, которые необходимы для решения инженерной технологической задачи.

Отношения и взаимосвязи параметров подпроцессов устанавливаются либо чисто эмпирически, либо логически, но с привлечением данных эксперимента. Они описываются с помощью уравнений, неравенств, а также с помощью графов, блок-схем, графиков, программ для ЭВМ и т. д.

Одной из основных является модель производительности удаления материала, или, в соответствии с ГОСТ 21445—84, модель режущей способности шлифовального круга. Экспериментально установлено, что режущая способность шлифовального круга (т. е. объемная производительность шлифования Q) определяется радиальной силой P_y , с которой рабочая поверхность круга прижимается к шлифуемой поверхности заготовки. В общем случае зависимость между Q и P_y с достаточной для практических целей точностью можно описать следующим выражением:

$$Q = K_{\text{реж}} P_y (1 + \lambda P_y), \quad (2.1)$$

где $K_{\text{реж}}$ — коэффициент режущей способности; λ — коэффициент нелинейности.

Во многих случаях можно ограничиться линейной моделью режущей способности, т. е. положить $\lambda = 0$. Тогда выражение (2.1) примет вид

$$Q = K_{\text{реж}} P_y \quad (2.2)$$

Чем «острее» шлифовальный круг (больше значение $K_{\text{реж}}$), тем выше объемная производительность процесса шлифования при тех же значениях радиальной силы P_y . Значение $K_{\text{реж}}$ зависит от характеристик шлифовального круга, способа и режима правки, скорости шлифовального круга и т. д. С увеличением размеров абразивных зерен и твердости шлифовального круга значение $K_{\text{реж}}$ снижается, а с увеличением скорости шлифования для большинства сталей увеличивается. Однако для некоторых марок стали оно незначительно. Кроме того, имеют место случаи, когда увеличение скорости шлифования v

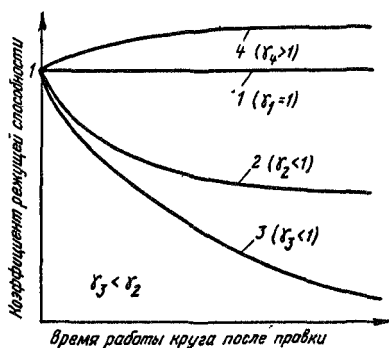


Рис. 2.22. Изменение относительного $K_{\text{реж}}$ при различных режимах работы круга

ведет к снижению коэффициента режущей способности (например, при шлифовании стали марки ШХ15). В зависимости от сочетания твердости шлифовального круга и параметров режима шлифования и правки в соответствии с графиками зависимости $K_{\text{реж}} / K'_{\text{реж}}$ от времени t возможны следующие режимы работы круга (рис. 2.22): шлифование с затуплением круга (кривая 3); шлифование с полным или частичным самозатачиванием круга (кривые 1, 2, 4). Главным параметром, определяющим режим работы круга, является критическая радиальная сила P_y в зоне шлифования. Критическая радиальная сила увеличивается при увеличении твердости шлифовального круга и скорости шлифования. Если фактическая радиальная сила больше критической, то круг работает с полным самозатачиванием, а если меньше, — то в режиме с частичным самозатачиванием круга или с затуплением (по мере уменьшения P_y). Следовательно, при увеличении производительности удаления материала заготовки круг, работающий в режиме затупления, переходит в режим частичного, а затем полного самозатачивания.

Зависимость $K_{\text{реж}}$ от времени τ работы круга после правки отражается следующей моделью затупления круга:

$$K_{\text{реж}} = K'_{\text{реж}} (\beta + \gamma\tau) / (\beta + \tau);$$

$$\gamma = \gamma_m P_y / (P_{\text{ус}} + P_y),$$

где $K'_{\text{реж}}$ — коэффициент режущей способности непосредственно после правки; β — константа, характеризующая темп затупления режущих кромок абразивных зерен и имеющая смысл времени, за которое $K_{\text{реж}}$ принимает свое среднее значение; γ_m — параметр, зависящий от режима правки круга (если в результате правки рабочая поверхность круга получает такую же приведенную режущую способность, как при работе в режиме полного самозатачивания, то $\gamma_m = 2$); $P_{\text{ус}}$ — критическое значение радиальной силы, при котором круг переходит в режим полного самозатачивания.

Значение $K'_{\text{реж}}$ зависит от характеристики круга, свойств материала заготовки и скорости подачи алмаза при правке. Эта зависимость отражается следующей моделью:

$$K'_{\text{реж}} = K''_{\text{реж}} s_{\text{прод}}^2 / (a^2 + s_{\text{прод}}^2),$$

где $s_{\text{прод}}$ — продольная подача при правке, м/мин; $K''_{\text{реж}}$ — максимально возможное для данной пары «круг — материал шлифуемой заготовки» значение коэффициента режущей способности; a — параметр, имеющий смысл скорости продольной подачи при правке, при которой $K_{\text{реж}} = 0,25 K''_{\text{реж}}$.

Влияние значения γ на характер зависимости $K_{\text{реж}} / K'_{\text{реж}}$ от времени τ показано на рис. 2.22. При шлифовании в режиме затупления или частичного самозатачивания влиянием размерного износа шлифовального круга на производительность удаления материала заготовки обычно пренебрегают, так как размерный износ круга очень мал по сравнению с толщиной снимаемого слоя (припуском). Однако при внутреннем шлифовании в режиме полного самозатачивания этого делать нельзя, так как размерный износ круга имеет тот же порядок, что и съем металла с заготовки.

Важной для управления процессом шлифования является модель микроформообразования, связывающая параметр шероховатости с радиальной силой шлифования, приходящейся на единицу ширины зоны контакта круга с деталью. Эксперименты показали, что увеличение радиальной силы увеличивает параметр шероховатости Ra , а увеличение скорости шлифования существенно его снижает. Значительное влияние на шероховатость шлифованной поверхности оказывает скорость продольной подачи при правке круга, которая обуславливает не только начальное значение Ra сразу после правки,

но и характер изменения шероховатости от времени τ работы круга после правки (рис. 2.23). Экспериментально доказано, что существует такое значение продольной подачи при правке, которое обеспечивает приблизительное равенство значений начального Ra_1 и стабильного Ra_{const} параметров шероховатости. Параметр Ra_{const} достигается по истечении времени приработки $\tau_{прир}$ круга.

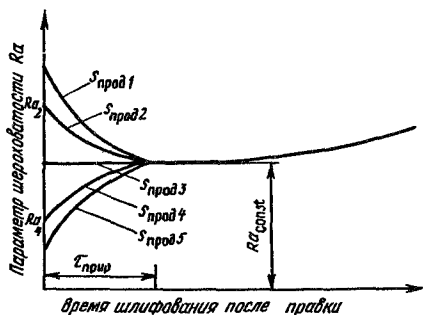


Рис 2.23 Зависимость параметра шероховатости Ra от времени τ работы круга после правки алмазом при его разных продольных подачах ($s_{прод1} > s_{прод2} > s_{прод3} > s_{прод4} > s_{прод5}$)

Если круг работает в режиме полного самозатачивания, то шероховатость шлифованной поверхности существенно зависит от параметров круга: зернистости, твердости и структуры. В таких условиях шероховатость возрастает с увеличением номера зернистости (в степени 0,5...0,7), с уменьшением твердости и процентного содержания зерен в объеме круга (в степени 0,5...1).

С достаточной для практических целей точностью экспериментальные зависимости Ra от условий шлифования можно отразить дробно-линейной моделью типа

$$Ra = (K_{R0} + K_{R1} P_y / B) ((A + G\tau) / (A + \tau)), \quad (2.3)$$

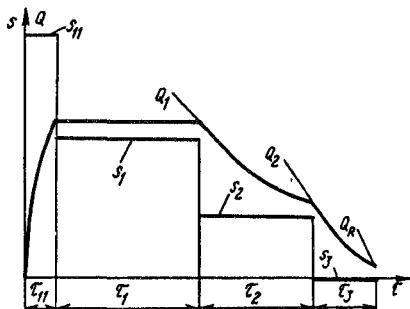
где K_{R0} , K_{R1} — параметры, зависящие от скорости круга и режима его правки, а второй множитель формулы отражает характер изменения Ra во времени; B — ширина врезного шлифования; A , G — параметры, зависящие от режима правки и характеристик круга.

Особенностью врезного и многопроходного шлифования является переменность производительности процесса удаления материала (съема припуска) в течение времени (цикла) обработки одной заготовки. Производительность изменяется вследствие изменения поперечной (вертикальной) подачи s и упругой деформации технологической системы (под действием силы P_y). Закон изменения поперечной подачи будем называть алгоритмом управления съемом припуска. Наиболее часто в практике применяется ступенчатый

алгоритм управления съемом припуска (СтАЛП), который состоит из ряда подач s , последовательно и ступенчато уменьшающихся от начала цикла съема припуска к его концу. Для круглого врезного шлифования наиболее общий СтАЛП показан на рис. 2.24. Он включает подачу s_{11} в течение времени τ_{11} (этап ускоренного врезания), подачу s_1 в течение времени τ_1 (этап предварительного шлифования), подачу s_2 в течение времени τ_2 (чистовое шлифование) и подачу s_3 , чаще всего равную нулю, в течение времени τ_3 (этап выхаживания).

Вследствие упругой деформации (y) технологической системы под действием радиальной силы P_y производительность шлифования Q изменяется за время цикла обработки не так, как меняется подача s (см. рис. 2.24), т. е. имеют место переходные процессы, когда при постоянной подаче производительность Q изменяется. Закон изменения Q на каждом этапе можно установить путем решения дифференциального уравнения баланса скоростей.

Рис. 2.24. График изменения производительности Q при круглом врезном шлифовании со ступенчатым алгоритмом управления съемом припуска



При врезном шлифовании подача s перемещения бабки шлифовального круга «расходуется» на скорость изменения радиуса r заготовки, на скорость изменения упругой деформации (натяга) технологической системы и на скорость уменьшения радиуса R шлифовального круга, которая учитывается только при шлифовании в режиме самозатачивания круга относительно небольшого диаметра, т. е.

$$s = \frac{dr}{dt} + \frac{dy}{dt} + \frac{dR}{dt}, \quad (2.4)$$

где $dr/dt = Q/(\pi dV)$; d, V — соответственно диаметр и ширина шлифуемой заготовки.

Пренебрегая скоростью изнашивания шлифовального круга, подставляя Q в соответствии с выражением (2.2) и учитывая, что, согласно определению понятия «средняя жесткость» (j), $y = P_y/j$, на основании формулы (2.4) получаем

$$y = ky + dy/dt, \quad (2.5)$$

где k — постоянная времени,

$$k = K_{\text{реж}} / (\pi dB). \quad (2.6)$$

Решение дифференциального уравнения (2.6) для этапа врезания дает следующее выражение:

$$Q = \pi dBs_{11} (1 - \exp(-k\tau)), \quad (2.7)$$

где $0 < \tau < \tau_{11}$.

Подача s_{11} переключается в тот момент, когда производительность Q будет соответствовать подаче s_1 , т. е.

$$Q = \pi dBs_1.$$

Тогда из формулы (2.7) легко получим значение τ_{11} . Анализ показал, что при $s_{11}/s_1 > 4...5$ время врезания практически перестает уменьшаться.

На этапе выхаживания $s = 0$ и решение уравнения (2.5) имеет вид

$$Q = Q_2 \exp(-k\tau), \quad (2.8)$$

где Q_2 — производительность к концу этапа чистового шлифования; $0 < \tau < \tau_3$.

Выхаживание следует заканчивать, когда производительность шлифования будет соответствовать требованиям к шероховатости шлифованной поверхности. Согласно упрощенной (без учета затупления круга) модели (2.3),

$$P_{y0} = (Ra - K_{R0})B/K_{R1},$$

где P_{y0} — радиальная сила в момент окончания шлифования. Тогда производительность Q_R в конце этапа выхаживания определяется по формуле

$$Q_R = K_{\text{реж}}B(Ra - K_{R0})/K_{R1}. \quad (2.9)$$

Время выхаживания легко определяется на основании формул (2.8) и (2.9). Анализ показал, что при малой жесткости и низком коэффициенте режущей способности время выхаживания значительно увеличивается. Для его сокращения применяются циклы шлифования с ускоренным выхаживанием, когда $s_3 < 0$ (обратная подача). В этом случае на основании принципа суперпозиции

$$Q = Q_2 \exp(-k\tau) - \pi dBs_3 (1 - \exp(-k\tau)).$$

При высоких жесткости и коэффициенте режущей способности

приходится применять «замедленное» выхаживание, когда $s_3 > 0$. Аналогично для этапа чистового шлифования

$$Q = Q_1 \exp(-k\tau) + \pi dBs_2(1 - \exp(-k\tau)), \quad (2.10)$$

где Q_1 — производительность в конце этапа предварительного шлифования; $0 < \tau < \tau_2$.

Слой материала, удаляемый с заготовки на каждом этапе шлифования, можно определить либо интегрированием полученных зависимостей (2.10) Q от τ , либо на основании баланса перемещений.

При ступенчатом алгоритме управления плоским многопроходным шлифованием цикл съема припуска также состоит из этапов предварительного шлифования, чистового шлифования и выхаживания. Подача s выполняется перед каждым i -м проходом или на один двойной ход (рис. 2.25 и 2.26).

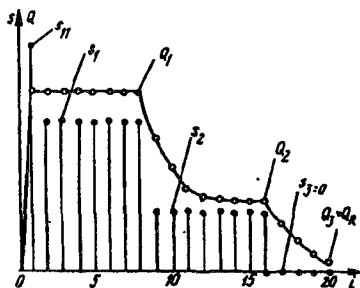


Рис. 2.25. График изменения производительности Q при многопроходном шлифовании со ступенчатым алгоритмом управления (подача на каждый ход)

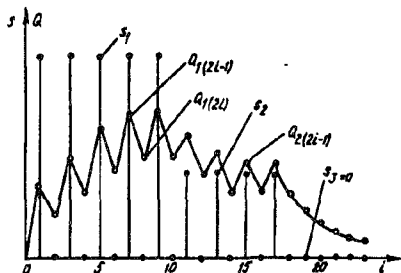


Рис. 2.26. График изменения производительности Q при многопроходном шлифовании со ступенчатым алгоритмом управления (подача на двойной ход)

На основании баланса перемещений для i -го прохода

$$s_i + y_{i-1} = t_i + y_i, \quad (2.11)$$

где s_i — подача перед i -м проходом; y_{i-1}, y_i — упругие деформации во время $(i-1)$ -го и i -го проходов; t_i — глубина шлифования во время i -го прохода.

На основании моделей (2.2) и (2.11) можно записать:

$$t_i = (s_i + Yt_{i-1}) / (1 + Y), \quad (2.12)$$

где $Y = vB / (K_{\text{реж}} f)$; v — скорость перемещения стола; B — ширина врезного шлифования (или поперечная подача $s_{\text{поп}}$). Параметр Y будем называть *относительной упругой деформацией*, так как он равен отношению y к t , т. е. $Y = y/t$.

Записав выражение (2.12) для каждого прохода этапа предварительного шлифования, получим для t_i геометрическую прогрессию. Тогда при шлифовании с подачей на каждый ход

$$t_{1i} = s_1 (1 - \alpha^i).$$

Если после i_1 проходов включается чистовая подача s_2 , то

$$t_{2i} = s_2 (1 - \alpha^i) + s_1 (1 - \alpha^{i_1}) \alpha^i,$$

где $0 < i < i_2$. Если после i_2 проходов чистового этапа осуществляется выхаживание, то

$$t_{3i} = (s_2 (1 - \alpha^i) + s_1 (1 - \alpha^{i_1}) \alpha^{i_2}) \alpha^i,$$

где $0 < i < i_3$; $\alpha = Y/(1 + Y)$.

Припуск, удаляемый за i проходов (или двойных ходов), определяется как сумма t_i или на основании баланса перемещений.

Анализ показал, что шлифование с подачей на каждый ход эффективнее по съему припуска, чем с подачей на двойной ход. Разница в съеме повышается при уменьшении параметра Y , т. е. с увеличением жесткости системы и коэффициента режущей способности.

Табл. 2.18. Значения коэффициента режущей способности $K_{\text{реж}}$, мм³/(с · Н)

Обрабатываемый материал	Шлифовальные круги	Пределы изменения $K_{\text{реж}}$	Среднее значение $K_{\text{реж}}$
Углеродистые стали	Электрокорундовые, на керамической связке, твердостью СМ1, СМ2	0,25...0,5	0,34
Легированные стали	То же	0,13.. 0,31	0,20
Быстрорежущие стали	— " —	0,03...0,1	0,05
	Эльборовые на бакелитовой связке	0,03...0,08	0,07
	Алмазные на бакелитовой связке	0,005...0,02	0,0125
Подшипниковая сталь	Эльборовые на бакелитовой связке	0,068...0,17	0,1
Твердые сплавы	Из карбида кремния	0,008...0,02	0,014
	Алмазные на бакелитовой связке	0,034...0,1	0,068
	Алмазные на металлической связке	0,017...0,05	0,025

Необходимые для расчетов средние значения $K_{\text{реж}}$ приведены в табл. 2.18, а рекомендуемые параметры режима шлифования и получаемые при этом точность и качество шлифованной поверхности — в табл. 2.19. Данные табл. 2.19 относятся к шлифованию конструкционных и инструментальных сталей при рабочей скорости круга 30...35 м/с.

Табл. 2.19. Режимы и качество шлифования

Код способа и вида шлифования	Параметры режима			Показатели качества обработанной поверхности	
	$s_{\text{поп}}$, мкм/об.заг.	$s_{\text{прод}}$, мм/ход	v , м/с	Квалитет точности размера	Параметр шероховатости Ra , мкм
КНП-п	10...25	(0,3...0,7) H	12...25	8...9	2,5...6,3
КНЧ-ч	5...15	(0,2...0,4) H	15...55	6...7	0,2...1,2
КНП-т	2...5	(0,1...0,2) H	10...20	5...6	0,05...0,3
КНВ-п	2,5...8	—	30...50	8...9	2,5...6,3
КНВ-ч	1...5	—	20...40	6...7	0,2...1,2
КНВ-т	0,2...0,6	—	15...30	5...6	0,05...0,32
КВП-п	5...20	(0,4...0,7) H		8...9	3,2...6,3
КВП-ч	2,5...10	(0,25...0,4) H	20...40	6...7	0,3...1,6
КВП-т	1...3	(0,1...0,2) H		5	0,08...0,3
КБП-п	20...100	0,5...4	20...120	8...9	2,5...6,3
КБП-ч	2,5...10	1,2...2	40...120	6...7	0,2...1,2
КБВ-п	10...20	—	10...45	8...9	2,5...6,3
КБВ-ч	1...5	—	10...30	6...7	0,2...1,2
ПП-п	15...40	(0,4...0,7) H	8...30	8...10	1,6...6,3
ПП-ч	5...15	(0,2...0,3) H	15...20	6...7	0,32...1,6
ПТ-л	15...40	—	4...12	8...10	2,5...6,3
ПТ-ч	5...10	—	2...3	6...7	0,32...1,6

Примечание. Коды способов шлифования: КНП — круглое наружное с продольной подачей в долях ширины круга H ; КНВ — круглое наружное с врезной (радиальной) подачей; КВП — круглое внутреннее с продольной подачей; КБП — круглое бесцентровое с продольной подачей (на проход); КБВ — круглое бесцентровое с врезной подачей; ПП — плоское периферией круга; ПТ — плоское торцом круга. Коды видов шлифования: п — предварительное; ч — чистовое; т — тонкое; заг. — заготовки.

2.9.5. Особенности формообразования обрабатываемой поверхности при бесцентровом шлифовании

Круглое бесцентровое шлифование (см. рис. 2.18) является высокопроизводительным способом обработки, широко применяемым в массовом и крупносерийном производстве. Основным недостатком бесцентрового шлифования является присущая ему тенденция к образованию поверхностей с отклонениями от круглой формы. Причиной этой особенности бесцентрового шлифования является специфическая ориентация заготовки в зоне обработки, где положение оси ее вращения определяется опорным ножом и ведущим кругом, которые соприкасаются с обрабатываемой поверхностью по образующим 1 и 3 (рис. 2.27). В области образующей 2 осуществляется шлифование. Параметрами схемы ориентации заготовки являются углы сдвига фаз между точками 1 и 2 (λ), а также 1 и 3 (η). Вместо этих параметров часто пользуются двумя опорными углами β и γ и углом скоса ножа ψ . Эти группы параметров связаны следующими равенствами:

$$\eta = 90^\circ + \psi - \beta; \quad \lambda = 90^\circ - (\psi + \gamma).$$

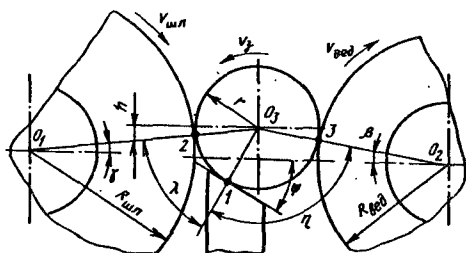


Рис. 2.27. Схема ориентации заготовки в зоне шлифования

Часто на практике используют параметры h (превышение оси заготовки) и ψ . Но данные параметры, несмотря на удобство измерения, не могут однозначно определять углы сдвига фаз, так как последние зависят еще и от радиусов ведущего и шлифовального кругов ($R_{вед}$, $R_{шл}$) и заготовки (r):

$$\eta = 90^\circ + \psi - 57,64/(R_{вед} + r);$$

$$\lambda = 90^\circ - \psi - 57,64/(R_{шл} + r).$$

Теоретический анализ позволил рекомендовать ряд рациональных сочетаний значений параметров λ и η , при которых обеспечивается исправление низких гармоник некруглости (число выступов от 2 до 25). Эти значения указаны в табл. 2.20.

Табл. 2.20. Рациональные сочетания значений λ и η

Номер варианта	λ , град	η , град	Номер варианта	λ , град	η , град
1	60	115	6	60	118
2	55	115	7	50	120
3	67	100	8	57	115
4	73	79	9	42	130
5	53	116	10	40	128

Погрешности формы шлифуемой поверхности вызывают колебания технологической системы с частотой, зависящей от частоты вращения заготовки и номеров главных гармоник, имеющих максимальную амплитуду. Поэтому после выбора параметров λ и η необходимо подобрать оптимальную частоту n_3 вращения заготовки (т. е. скорость v_3).

2.10. Эластичное шлифование

Эластичное шлифование отличается от обычного характером связи абразивных зерен с инструментальным шпинделем. В данном случае конструкция инструмента допускает в процессе работы значительное упругое перемещение рабочих зерен, попадающих в зону контакта с обрабатываемой заготовкой, в направлении нормальной составляющей (P_y) силы резания. Такое закрепление абразива в эластичной связке позволяет: уменьшать напряженность теплового потока в зоне обработки; увеличивать количество абразивных зерен, одновременно участвующих в работе; в некоторых случаях создавать условия для самоочистки рабочей поверхности инструмента.

Основное назначение эластичного шлифования — повышение качества поверхности без исправления погрешности ее формы. Однако в некоторых случаях способ эластичного шлифования применяется для формообразования (размерной обработки). В зависимости от требований к качеству обработанной поверхности различают зачистку, шлифование и полирование. При зачистке целью обработки является удаление дефектного слоя на слитках и отливках или удаление заусенцев после механической обработки (штамповки), а также заделка отдельных дефектов поверхностей. Целью эластичного шлифования и полирования является повышение качества поверхности, т. е. снижение параметра Ra и повышение уровня сжимающих остаточных напряжений в подповерхностных слоях материала.

В качестве эластичного абразивного инструмента используют: абразивосодержащие эластичные круги на высокопористой вулканитовой, поролоновой или нетканой волокнистой связке; эластичные круги с абразивным покрытием на текстильную или войлочную основу, а также на круги специальной конструкции; изделия из шлифовальной шкурки — диски, бесконечные ленты, барабаны, лепестковые круги.

Схемы эластичного шлифования абразивосодержащими и абразивопокрытыми кругами соответствуют аналогичным схемам обычного шлифования. Но в отличие от обычного шлифования в зоне контакта инструмент принимает форму обрабатываемой поверхности.

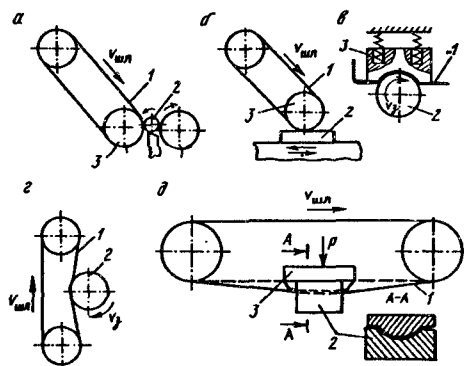


Рис. 2.28. Схемы ленточного шлифования:

а — круглого бесцентрового; б — плоского; в, г — круглого наружного с копиром и без него; д — фасонного

Некоторые схемы ленточного шлифования (полирования) показаны на рис. 2.28. Эти схемы обладают более широкими, чем обычное шлифование, возможностями управления процессом резания за счет регулирования натяжения ленты 1 и жесткости контактного ролика (или копира) 3, поджимающего ленту к поверхности заготовки 2. Кроме того, рабочая поверхность бесконечной ленты больше поверхности шлифовального круга, лента не нуждается в правке и балансировке, закрепление зерен на поверхности ленты упругое. Часто используются схемы обработки при скорости перемещения ленты, равной нулю (рис. 2.28, в), а скорость $v_{шл}$ обработки равна скорости $v_з$ вращения заготовки. Для повышения качества обработанной поверхности на рабочую поверхность ленты дополнительно наносится полировальная паста.

Главные факторы, определяющие качество обработанной поверхности при эластичном шлифовании, — усилие (давление) прижима, зернистость абразива и рабочая скорость шлифования (полирования). Значения этих факторов для различных видов эластичного

шлифования приведены в табл. 2.21. Рабочая скорость влияет в основном на производительность и стойкость инструмента. В качестве охлаждающей среды используются водные растворы нитрида натрия или соды, сульфозфрезол, масляные эмульсии, масло. При шлифовании титановых сплавов рекомендуется рабочую скорость снижать до 10...15 м/с, а удельное давление — до 0,02...0,15 МПа, а при окончательном полировании удельное давление уменьшают до 0,03...0,1 МПа.

Табл. 2.21. Технологические показатели эластичного шлифования

Способ и вид обработки	Зернистость абразива	Удельное давление, МПа	Скорость обработки, м/с	Параметр шероховатости Ra , мкм
Зачистка	40...50	0,2...0,4	20...30	1,15...2,5
Шлифование	16...25	0,05...0,2	20...30	0,32...1,25
Полирование:				
предварительное	8...12	0,1...0,2	10...30	0,16...0,63
окончательное	M6...M20	0,05...0,15	10...30	0,04...0,32
тонкое	M5...M10 или паста ГОИ	0,05...0,1	10...30	0,02...0,08

Кроме высокоскоростного, применяют низкоскоростное полирование (со скоростью 0,15...1 м/с) при неподвижной ленте и вращении детали. Часто при этом абразивной ленте сообщается осциллирующее движение.

2.11. Обработка абразивными брусками

2.11.1. Хонингование

Хонингование применяют для повышения точности формы, размеров и снижения шероховатости поверхностей (чаще всего внутренних цилиндрических) в условиях серийного и массового производства после операций растачивания, шлифования, развертывания и протягивания. После хонингования получают, в зависимости от условий обработки и исходной шероховатости, значения $Ra = 0,08...0,32$ мкм и качества точности 5...7.

Обработка поверхности при хонинговании производится абразивными, эльборовыми или алмазными брусками, закрепленными в специальной головке, которая называется *хоном*. Головке сообщают вращательное движение с окружной скоростью $v_{ок}$, возвратно-поступательное со скоростью $v_{вп}$, а бруски при этом с силой $P_{рад}$

прижимаются к обрабатываемой поверхности, обеспечивая радиальную подачу. Схема процесса показана на рис. 2.29, а. При вибрационном хонинговании на основное возвратно-поступательное или вращательное движение хонинговальной головки (или детали) накладывается дополнительное колебательное движение с малой (обычно 1...4 мм) амплитудой и частотой 20 Гц.

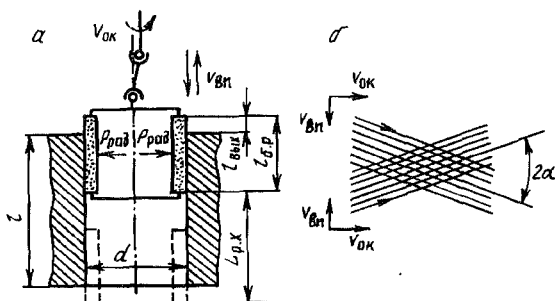


Рис. 2.29. Схема хонингования (а) и сетка рисок (б) ($L_{р.х}$ — длина рабочего хода хона)

Особенностью процесса хонингования является полное или частичное самоориентирование обрабатываемой поверхности и режущего инструмента (брусков), которое обеспечивается за счет степеней свободы, сообщаемых головке шарнирным креплением или обрабатываемой заготовке за счет способа закрепления установочного приспособления на станке.

Кроме внутренних цилиндрических, хонингованием обрабатывают наружные цилиндрические и плоские поверхности. С помощью хонингования возможна обработка широкого диапазона материалов: стали закаленной и незакаленной, серого, легированного и закаленного чугуна, алюминиевых и медных сплавов и твердых металлокерамических материалов.

Отечественная промышленность выпускает абразивные хонинговальные бруски типа БХ шириной B от 2 до 15 мм, высотой H от 3 до 14 мм и длиной $l_{бр}$ от 15 до 150 мм. Выбор размеров бруска зависит от размеров обрабатываемой поверхности (l, d). Длина выхода брусков за торец хонингуемого отверстия (см. рис. 2.29, а) $l_{вых} = l_{бр}/3$. Ширина бруска зависит от диаметра обработки и выбранный количество брусков (N) в хоне, т. е.

$$BN = (0,25...0,5) \pi d.$$

Материал абразивных зерен хонинговальных брусков зависит от обрабатываемого материала: для чугуна, цветных сплавов и незакаленной стали применяется карбид кремния зеленый (марка 63С), а для закаленной стали — электрокорунд (марка 24А). Зернистость абразивного материала выбирается в зависимости от требуемой шероховатости в соответствии с табл. 2.22. В этой таблице указаны

также исходная шероховатость и рекомендуемый припуск. Степень твердости абразивных брусков зависит от режимов хонингования и применяемых СОЖ. Она изменяется в пределах от СТ2 до Т2 для обработки серого чугуна и от С1 до СТ2 для обработки закаленной стали.

Табл. 2.22. Зернистость брусков и припуски при хонинговании серого чугуна

Параметр Ra , мкм		Припуск, мм	Номер зернистости
заданный	исходный		
2,5	5	0,08...0,16	12...16
1,25	2,5	0,05...0,08	10
0,63	1,25	0,02...0,03	6
0,32	0,63	0,005...0,008	M20...M28
0,16	0,63	0,005...0,008	M14...M20
0,08	0,32	0,005...0,008	M10...M14

Скорость возвратно-поступательного движения $v_{вп}$ при предварительном хонинговании выбирается максимально возможной для данного типа оборудования ($v_{вп} = 15...20$ м/мин). При чистовом хонинговании ее снижают на 20...50%. Скорость вращения $v_{ок}$ рассчитывают по формуле $v_{ок} = K v_{вп}$, где $K = 3...5$ при хонинговании чугуна, а при хонинговании стали $K = 2...4$. Такое отношение $v_{ок}/v_{вп}$ обеспечивает необходимый угол перекрещивания 2α (рис. 2.29, б), от которого зависит эффективность исправления исходных погрешностей геометрической формы и отчасти интенсивность съема материала (чем меньше K , тем выше интенсивность съема).

Интенсивность съема и качество обработки сильно зависят от давления брусков на обрабатываемую поверхность.

Интенсивность съема существенно увеличивается с возрастанием давления брусков, однако для каждой характеристики абразивных или алмазных брусков существует предельное давление, превышение которого ведет к интенсивному изнашиванию, поломкам или засаливанию (для алмазных брусков).

При предварительном хонинговании предельное давление $p = 1...1,2$ МПа, а при окончательном $p = 0,3...0,8$ МПа. При хонинговании чугуна и стали рекомендуется следующий цикл:

- 1) врезание — 3...5 с при $p = 0,2...0,4$ МПа;
- 2) основная работа — 15...20 с при $p = 0,5...1,2$ МПа;
- 3) выхаживание — 3...6 с при $p = 0,1...0,3$ МПа.

В зависимости от значений исходных параметров качества назначаются две или три операции хонингования в соответствии с табл. 2.23.

Табл. 2.23. Количество операций и припуски при хонинговании

Исходные значения		Номер операции	Припуск на операцию, мкм	Полученные хонингованием значения	
погрешности формы, мкм	параметра Ra , мкм			погрешности формы, мкм	параметра Ra , мкм
100...150	10...2,5	1	150...200	15...20	2,5...0,63
		2	20...30	6...10	0,63...0,16
		3	12...15	4...5	0,32...0,08
50...90	10...2,5	1	80...120	10...18	2,5...0,63
		2	15...25	5...8	0,63...0,16
		3	8...12	3...4	0,32...0,08
25...40	5...1,25	1	50...70	8...12	1,25...0,32
		2	12...15	4...6	0,63...0,16
		3	6...12	2...3	0,32...0,08
12...15	2,5...0,63	1	25...35	5...9	1,25...0,16
		2	10...12	2...3	0,32...0,08
6...12	2,5...0,63	1	15...20	2...4	0,63...0,16
		2	4...6	1...2	0,32...0,08

2.11.2. Суперфиниширование

Суперфиниширование — это отделочная обработка цилиндрических, конических, тороидальных, сферических и плоских поверхностей деталей мелкозернистыми абразивными брусками. Оно существенно повышает эксплуатационные свойства поверхностей, работающих в условиях трения скольжения и качения, так как с помощью этого способа можно достичь параметра шероховатости $Ra = 0,02...0,16$ мкм и погрешности формы (огранки), не превышающей 0,5 мкм. При этом удаляется дефектный слой, полученный в ходе предыдущей операции (шлифования), а поверхность после суперфиниширования получает упрочнение.

Схема суперфиниширования показана на рис. 2.30. Заготовка 1 вращается с частотой n и перемещается с осевой подачей $s_{\text{прод}}$. Мелкозернистый абразивный брусок 4 (или два бруска) с помощью пружин 3, расположенных в корпусе 2, прижимается к обрабаты-

ваемой заготовке с относительно небольшой силой и, кроме того, получает колебательное движение с частотой от 10 до 50 Гц и амплитудой $2A = 2...5$ мм. В результате относительное движение брусков имеет вид синусоидальной траектории 5.

При суперфинишировании коротких поверхностей продольная подача $s_{\text{прод}} = 0$. Тогда оно называется врезным и длина бруска должна быть несколько больше, чем длина обрабатываемой поверхности. В подшипниковой промышленности широко используется бесцентровая схема ориентации подвергаемых суперфинишированию роликов с помощью двух подающе-базирующих валков, оси которых скрещиваются.

Материал абразивных зерен брусков выбирается в зависимости от обрабатываемого материала. Для предварительного суперфиниширования стальных деталей используется электрокорунд белый (марка 24А), а для окончательного — хромистый электрокорунд (32А). Для суперфиниширования чугунных, незакалённых стальных заготовок, заготовок из цветных сплавов и нержавеющей сталей применяют карбид кремния зеленый (64С). Для обработки заготовок из высокотвердых легированных сталей выбирают эльбор (марки ЛО и ЛП). Для обработки деталей из твердых сплавов и технической керамики используют алмазные зерна (АСО и АСП).

Зернистость брусков определяется требованиями к шероховатости поверхности. В зависимости от исходной шероховатости обработка осуществляется в два или даже в три перехода (табл. 2.24). Твердость брусков зависит от материала и термической обработки заготовки. Для суперфиниширования стали прессованными брусками из карбида кремния зеленого марки 63С при твердости HRC_3 обрабатываемого материала принимаются следующие степени твердости брусков:

HRC_3	10...20	25...35	40...50	55...60	60...65
Твердость брусков ,	СМ1	М3...СМ1	М3	М1...М2	ВМ2...М1

Литые бруски при прочих равных условиях следует брать на две-три степени тверже. При обработке чугуна твердость следует повышать до степеней С...СТ. Данные рекомендации справедливы при суперфинишировании заготовок с исходным значением $Ra = 0,32...0,63$ мкм. При большей исходной шероховатости твердость

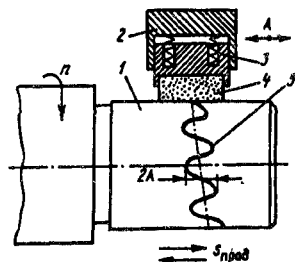


Рис. 2.30. Схема суперфиниширования

брусков необходимо повышать. Твердость брусков из эльбора на керамической связке следует назначать в диапазоне степеней СТ2...Т2. Скорость вращения заготовки при суперфинишировании обычно не превышает 8...15 м/мин, а при использовании эльборовых брусков ее можно увеличить до 30 м/мин. Частота и амплитуда колебаний бруска выбираются такими, чтобы максимальная скорость колебательного движения была примерно равна скорости вращения заготовки.

Табл. 2.24. Зернистость брусков при суперфинишировании

Параметр Ra исходной поверхности, мкм	Параметр Ra поверхности после обработки, мкм							
	0,16		0,08		0,04		0,02	
	Переход	Зернистость	Переход	Зернистость	Переход	Зернистость	Переход	Зернистость
1,25	1	M20, M14	1	M14	—	—	—	—
			2	M7				
0,63	1	M14, M10	1	M14	1	M20, M14	—	—
			2	M7	2	M7		
				M3	3	M3		
0,32	1	M14, M10	1	M10, M7	1	M14, M10	1	M14, M10
					2	M3	2	M7, M5
						3	M1	
0,16	—	—	—	—	1	M7	1	M7, M5
					2	M3	2	M1

Рекомендуемые значения давления бруска на суперфинишируемую стальную поверхность для брусков зернистостью M20 составляют 0,3...0,4 МПа, для брусков зернистостью M14...M5 — 0,2...0,3 МПа, а для брусков зернистостью M3...M1 — 0,15...0,2 МПа. При обработке металлов, имеющих малую твердость, давление следует уменьшать до 0,1...0,2 МПа. В ряде случаев рабочие циклы суперфиниширования осуществляют с переменным давлением: вначале обработка проводится при пониженном на 20...40 % давлении, затем его повышают до рекомендуемого и в конце опять снижают. Интервалы длительности этапов данного цикла относятся как 2:3:5.

Продольную подачу при суперфинишировании поддерживают обычно в пределах 0,5...1,2 м/мин. Припуск на суперфиниширование зависит от исходной и требуемой шероховатости (табл. 2.25).

Табл. 2.25. Припуск на суперфиниширование

Параметр шероховатости Ra , мкм		Припуск на диаметр, мкм	Параметр шероховатости Ra , мкм		Припуск на диаметр, мкм
требуемый	исходный		требуемый	исходный	
0,16	1,25	20...25	0,04	0,32	8...10
	0,63	10...15			
0,08	0,63	10...15	0,02	0,32	8...10
	0,32	8...10			

При суперфинишировании закаленных сталей в качестве СОЖ в большинстве случаев используют керосиново-масляную смесь (85...90% керосина и 10...15% индустриального масла И-40А), в которую добавляют олеиновую кислоту (3...5%). При обработке вязких, пластичных материалов следует увеличивать (до 70...80%) содержание масла. Необходима тщательная очистка СОЖ от отходов обработки.

Суперфиниширование при наличии достаточного припуска в значительной степени исправляет некруглость (огранку). После обработки она может быть снижена до 0,3...0,7 мкм. Степень и быстрота исправления зависят от способа передачи давления на брусок. Лучшие результаты получаются, если давление на брусок передается непосредственно от штока гидро- или пневмоцилиндра. В таком случае исходная некруглость в 3...5 мкм исправляется до 0,8...1,5 мкм за 30 с и до 0,3...0,7 мкм за 60...90 с. Точность формы детали в продольном направлении зависит от соотношения длины бруска и обрабатываемой поверхности, а также от перебега бруска за ее край. При суперфинишировании с продольной подачей перебег заготовки составляет 0,25...0,33 длины бруска.

2.12. Обработка свободным абразивом

2.12.1. Доводка

Доводка (притирка) используется не только как один из способов досборочной размерной обработки, обеспечивающих герметичность неподвижных соединений, но и как окончательная (финишная) обработка, обеспечивающая высокую точность размеров и формы (0,5...0,1 мкм), а также параметр шероховатости $Ra = 0,01...0,16$ мкм. Схемы доводки плоских, цилиндрических и сферических поверхностей с помощью притиров показаны на рис. 2.31. При этом абразивная суспензия непрерывно подается в зону обработки.

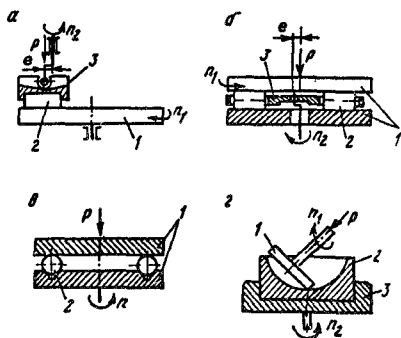


Рис. 2.31. Схемы доводки плоских (а), цилиндрических (б) и сферических (в, г) поверхностей: 1 — притиры; 2 — обрабатываемые заготовки; 3 — держатели заготовок

Как правило, доводку выполняют после шлифования. Припуск (Δ) при доводке определяется параметром исходной шероховатости Rz и погрешностью формы заготовки. В некоторых случаях припуск под доводку увеличивают для удаления дефектного подповерхностного слоя, полученного при шлифования.

Доводку осуществляют за несколько последовательных операций, число которых зависит от требований к точности и шероховатости (табл. 2.26). Для обеспечения стабильных размеров после доводки необходимо, чтобы разноразмерность заготовок не превышала $(0,2...0,3)\Delta$. Это достигается путем предварительной сортировки заготовок.

Табл. 2.26. Характеристики доводочных операций для плоских поверхностей

Требуемые характеристики поверхности		Количество операций	Припуск на операцию, мкм	Параметры абразива и режима доводки			
Точность, мкм	Параметр Ra , мкм			Зернистость	Скорость, м/мин	Давление, МПа	Время, мин
3...5	0,16	1	30...50	M28	50	0,13	4...5
1...2	0,08	1	30...50	M28	50	0,13	4...5
		2	5...10	M14	20	0,14	2...3
0,2...0,5	0,04	1	30...50	M28	50	0,13	4...5
		2	10...15	M7	20	0,14	2...3
		3	5...7	M3	12	0,11	2
0,1...0,3	0,01...0,02	1	30...50	M28	50	0,13	4...5
		2	10...15	M7	18	0,14	2...3
		3	5...7	M3	12	0,11	2
		4	1...2	M2...M1	8	0,09	2...3

В процессе доводки притир изнашивается неравномерно. Поэтому, кроме исправления погрешности формы обрабатываемой поверхности, происходит перенос (копирование) погрешности формы притира на эту поверхность. Чтобы получить требуемую точность обработки, притир необходимо периодически править для компенсации неравномерности его износа.

Экспериментальные исследования доводки цилиндрических заготовок (см. рис. 2.31, б) показали, что неплоскостность притиров также приводит к появлению погрешности формы детали в поперечном сечении (некруглости). Однако вклад формы притира в общую погрешность формы детали составляет всего 27%, а исходной погрешности формы заготовки — 56%. Некруглость доведенных деталей можно уменьшить за счет уменьшения давления от действия силы P , увеличения отношения частот вращения n_1 и n_2 притиров и вала эксцентрика-держателя, за счет уменьшения эксцентриситета e .

2.12.2. Вибрационная обработка

Вибрационная обработка в зависимости от характера применяемой рабочей среды представляет собой механический или химико-механический процесс удаления частиц материала и его оксидов с поверхности заготовок, а также сглаживания микронеровностей путем их пластического деформирования частицами рабочей среды. Эти процессы обусловлены микроударами частиц рабочей среды об обрабатываемую поверхность, вызванными действием направленных вибраций, сообщаемых рабочей камере 1, в которой размещены обрабатываемые заготовки 3 и рабочая среда 2 (рис. 2.32, а). Рабочая камера смонтирована на спиральных (4) и плоских (5) пружинах и может совершать колебательные движения с частотой от 15 до 50 Гц и амплитудой от 0,5 до 8 мм под действием сил инерции вращающегося несбалансированного ротора 6. Под действием вибраций рабочая среда и заготовки совершают два вида движений: колебательное и циркуляционное (медленное вращение всей массы). В процессе обработки заготовки занимают различное положение в рабочей среде, что обеспечивает достаточно равномерную обработку всех поверхностей.

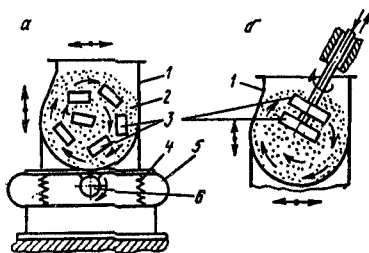


Рис. 2.32. Схемы обычной (а) и шпиндельной (б) виброабразивной обработки

Процесс обработки обычно протекает при непрерывной подаче СОЖ, которая обеспечивает удаление продуктов изнашивания, смачивание заготовок и рабочей среды и равномерное распределение заготовок в рабочей среде. Интенсивность и качество обработки зависят от состава СОЖ и ее уровня в рабочей камере.

Вибрационная обработка позволяет выполнять следующие операции: 1) очистные (очистка заготовок от окалины, накали и коррозии, удаление заусенцев, скругление острых кромок); 2) отделочно-упрочняющие (полирование поверхностей, поверхностное упрочнение). В зависимости от целей обработки изменяются амплитуда и частота вибраций, а также состав рабочей среды и СОЖ.

Табл. 2.27. Рекомендации по выбору рабочих сред

Абразивный компонент и наполнитель	СОЖ	Вид операции
Абразивная крошка зернистостью 16...125, твердостью Т...ЧТ	Содовый раствор	Удаление заусенцев и окалины, грубое шлифование
Абразивная крошка зернистостью 8...16, твердостью Т...ЧТ	Содовый раствор	Удаление небольших заусенцев, скругление кромок, чистовое шлифование черных сплавов и бронзы
	Раствор хромового ангидрида	То же для алюминиевых сплавов
Стеклоанная крошка или стеклоаннные шары	Мыльно-содовый раствор с олеиновой кислотой (1%)	Полирование черных и цветных сплавов
	Раствор хромпика	Полирование алюминиевых сплавов
Древесная крошка, шлифпорошок или полировальные пасты	Всухую или при слабом увлажнении	Чистовое шлифование и полирование
Стальная и чугунная дробь, стальная проволока с добавлением абразивной крошки зернистостью 40...125, твердостью СТ...ВТ	Содовый раствор	Очистка литья от формовочных материалов

В состав рабочей среды входят: абразивные компоненты (абразивная крошка, шлифзерно, галька, гранит, известняк), наполнители (металлические шарики или иголки, древесная крошка, резиновая крошка, кусочки кожи, пластмассы), водные растворы каль-

цинированной соды с моющими, разделяющими, травящими, пассивирующими или блескообразующими добавками. Кроме того, применяют мыльные растворы, а для отделки — водный раствор аммиака. Некоторые рекомендации по выбору рабочей среды приведены в табл. 2.27.

Скорость съема металла с заготовок существенно увеличивается с повышением частоты и амплитуды колебаний, особенно для бронзы. Аналогично влияют зернистость абразивной крошки и размер гранул. Наиболее интенсивно происходит удаление материала с острых кромок, выступов и открытых поверхностей, причем среди последних более равномерно и интенсивно обрабатываются цилиндрические и сферические поверхности и сравнительно хуже плоские. Обработка в глубоких карманах, отверстиях, пазах и углублениях происходит медленнее.

На интенсивность съема материала существенное влияние оказывают химически активные добавки, вводимые в раствор. Так, если съем при обработке стали с применением СОЖ в виде 1,5%-го раствора кальцинированной соды принять за 1, то добавка к нему олеиновой кислоты (1%) дает относительный съем, равный 1,89. А применение водного раствора серной кислоты и хромового ангидрида слабой концентрации дает относительный съем, равный 3,78. Добавление стеариновой (1%) кислоты в керосин обеспечивает относительный съем, равный 5,68.

Указанные параметры условий виброабразивной обработки оказывают существенное влияние и на шероховатость обработанной поверхности. Для уменьшения значения параметра Ra необходимо уменьшить амплитуду вибраций, зернистость абразивной крошки, использовать крошку на бакелитовой или вулканитовой связке и с повышенной твердостью. Применение поверхностно-активных добавок наряду с увеличением интенсивности съема может снизить значение Ra . С увеличением твердости заготовки в пределах от 50 до 300 единиц по Бринеллю параметр Ra уменьшается в 2...2,5 раза. При дальнейшем увеличении твердости Ra практически не изменяется.

Повышение качества и производительности достигается применением шпиндельной виброабразивной обработки, схема которой показана на рис. 2.32, б. Скорость вращения на поверхности заготовки достигает 1...15 м/с.

2.12.3. Магнитоабразивная обработка

Магнитоабразивное полирование в зависимости от роли, которую выполняет магнитное поле, можно разделить на следующие группы: 1) магнитное поле формирует из порошковой ферромагнитной абразивной массы своеобразный режущий инструмент и

обеспечивает необходимые силы резания, а движение резания сообщается обрабатываемой заготовке обычным приводом; 2) магнитное поле в дополнение к двум первым функциям, присущим полированию первым способом, передает режущему инструменту движение резания от перемещающихся полюсов магнитов; 3) магнитное поле обеспечивает силы резания и сообщает непосредственно ферромагнитной массе движение, необходимое для резания.

Схемы магнитоабразивного полирования первым способом показаны на рис. 2.8. Успешно могут обрабатываться и внутренние поверхности вращения (рис. 2.33, а). При этом один из полюсов электромагнита 2 вводится в отверстие заготовки 3 с рабочим зазором, заполняемым ферромагнитным абразивным порошком 1. Магнитный поток пронизывает в радиальном направлении стенку заготовки и рабочий зазор, удерживая в нем абразивный порошок и обеспечивая необходимые силы резания. Главным движением резания является вращение заготовки с частотой n . Дополнительное

движение подачи s вдоль оси заготовки сообщается либо электромагниту, либо заготовке. Схема магнитоабразивного полирования наружной поверхности большого диаметра D_3 заготовки 3 показана на рис. 2.33, б.

Рис. 2.33. Схемы магнитоабразивного полирования внутренней (а) и наружной (б) поверхностей вращения первым способом

Магнитоабразивное полирование вторым способом показано на рис. 2.34. Схемы а и б предназначены для полирования плоскостей. В первом случае заготовка 2 изготовлена из немагнитного материала, а электромагниты 1, расположенные равномерно по периферии цилиндрического корпуса приспособления, удерживают ферромагнитный абразивный порошок 3 и образуют своеобразный абразивный инструмент с регулируемой жесткостью крепления режущих эле-

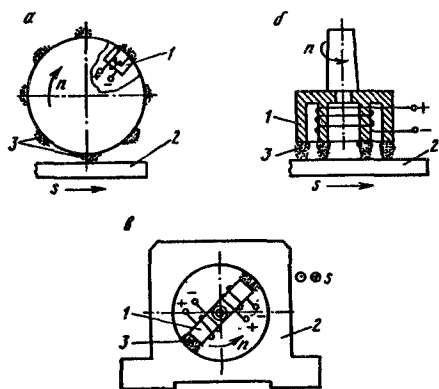
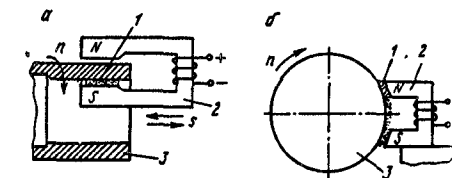


Рис. 2.34. Схемы магнитоабразивного полирования вторым способом

ментов. Во втором случае магнитный поток от электромагнита 1 замыкается через обрабатываемую заготовку 2 из магнитопроводного материала и рабочие зазоры, заполненные ферромагнитным абразивным порошком 3. Полирование отверстия в корпусной детали 2 из магнитопроводного материала можно осуществить порошком 3 путем принудительного вращения с частотой n электромагнита 1 и его осевой подачи (рис. 2.34, в).

Схема магнитоабразивного полирования третьим способом изображена на рис. 2.35. Заготовка 1, закрепленная на вращающемся с частотой n шпинделе, опущена в ванну, которая заполнена магнитоабразивной суспензией 3. Переменное по величине и направлению магнитное поле, создаваемое магнитом 2, сообщает абразивной массе рабочее движение резания. Для равномерной обработки заготовка 1 медленно поворачивается (рис. 2.35, а).

Для полирования немагнитной листовой заготовки 1 ее протягивают над ванной, заполненной ферромагнитным абразивным порошком 3 (рис. 2.35, б). Периодическое включение электромагнита 2 с заданной частотой заставляет порошок подниматься со дна ванны и вступать в контакт с полируемой поверхностью.

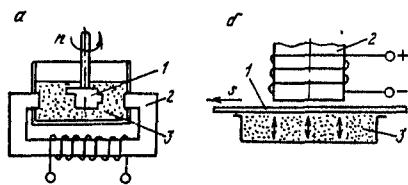


Рис. 2.35. Схемы магнитоабразивного полирования третьим способом

Для магнитоабразивной обработки разработаны специальные ферромагнитные абразивные материалы — ферриты и керметы. *Ферриты* — это неметаллические магнитные материалы, представляющие собой твердые растворы оксида железа Fe_2O_3 с оксидами двухвалентных металлов (Ni, Mn, Zn, Mg, Cu и т. д.). После термической обработки (обжига) ферриты обладают высокой твердостью. Керамические материалы — *керметы* — представляют собой композиции металлов и оксидов, получаемые методом порошковой металлургии (смешивание, прессование, спекание, механическое дробление в порошок). Различают керметы, изготовленные на базе твердых тугоплавких соединений (карбидов, боридов, силицидов), и оксидные (на базе электрокорунда). Для металлической связки керметов используются Ni, Co, Fe, Cr.

Рекомендуемые параметры режима магнитоабразивного полирования приведены в табл. 2.28. Эксперименты показали, что эффективное уменьшение шероховатости обрабатываемой поверхности происходит в течение первых 20...30 с обработки, а в дальнейшем интенсивность снижения значения параметра Ra резко уменьшается. Исходная шероховатость с $Ra = 0,63...1,25$ мкм снижается до $Ra =$

= 0,04...0,08 мкм. При увеличении магнитной индукции и скорости вращения заготовки, уменьшении рабочего зазора происходит интенсивное снижение исходной волнистости и огранки. Волнистость может быть уменьшена в 8...10 раз (с 2...3 до 0,2...0,4 мкм), а огранка — в 1,5...2 раза (с 2...3 до 0,8...2 мкм).

Табл. 2.28. Режимы магнитоабразивного полирования, характеристики абразивных зерен и СОЖ

Параметры режима обработки, абразивных зерен и СОЖ	Значения параметров
Магнитная индукция в рабочем зазоре, Тл	0,6...1,8
Рабочий зазор, мм	0,3...3
Размеры зерен порошка, мм	0,05...0,3
Припуск, мм	0,005...0,03
Давление порошка на заготовку, МПа	0,8...1
Скорость вращения заготовки, м/мин	90...300
Скорость движения осцилляции, м/мин	0,6...30
Подача, мм/мин	0,6...900
Время обработки, с	15...120
СОЖ	10%-я эмульсия из эмульсола Э2 на основе воды

Магнитоабразивное полирование обеспечивает высокую интенсивность съема припуска (до 1 мкм/с) при низкой температуре в зоне обработки. Поэтому в подповерхностном слое материала детали снижается количество остаточного аустенита и преобладают сжимающие напряжения, отсутствуют прижоги и микротрещины.

2.13. Обработка поверхностным пластическим деформированием

Основное назначение обработки *поверхностным пластическим деформированием* (ППД) — снижение параметра шероховатости до $Ra = 0,04...0,16$ мкм. Дополнительным эффектом применения этой обработки является упрочнение подповерхностного слоя материала детали (повышается твердость и создаются сжимающие остаточные напряжения).

Разработано и широко используется в машиностроении большое количество способов обработки ППД и устройств для их реализации. Рабочие инструменты для ППД сравнительно просты, а обработка ими может осуществляться на обычных универсальных или специ-

ализированных станках. Все способы обработки ППД разделяются на две группы: 1) способы выглаживания поверхностей (рис. 2.36), когда между инструментом и заготовкой имеет место трение скольжения; 2) способы накатывания поверхностей (рис. 2.37), когда между рабочим элементом инструмента и заготовкой имеет место трение качения с возможным проскальзыванием.

К способам выглаживания относится *дорнование* (калибрование) отверстий. Дорнование отверстий может осуществляться шаром 2 (рис. 2.36, а), выглаживающей протяжкой 2 (рис. 2.36, б) или прошивкой, которую называют *дорном*. Основным технологическим параметром процесса является натяг: $\Delta_{нат} = d_{ин} - D_3$, где $d_{ин}$ — диаметр обрабатывающего инструмента; D_3 — диаметр отверстия заготовки 1 до дорнования. Дорнование отверстий в толстостенных заготовках (у которых отношение толщины стенки к диаметру обрабатываемого отверстия больше 0,25) осуществляется с относительно малым натягом, значение которого зависит от диаметра обрабатываемого отверстия, точности его предварительной обработки растачиванием или развертыванием, материала заготовки и его твердости. Например, для стальных заготовок при изменении диаметра дорнуемого отверстия от 15 до 65 мм натяг изменяется

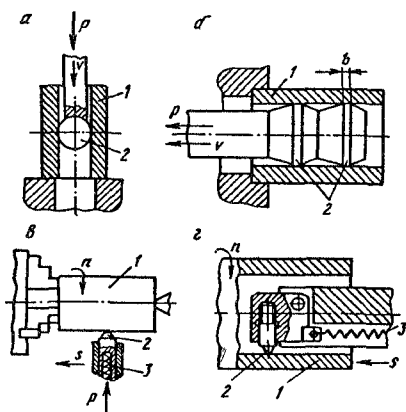


Рис. 2.36. Схемы обработки способами ППД со скольжением инструментов: 1 — заготовка; 2 — инструмент; 3 — пружина

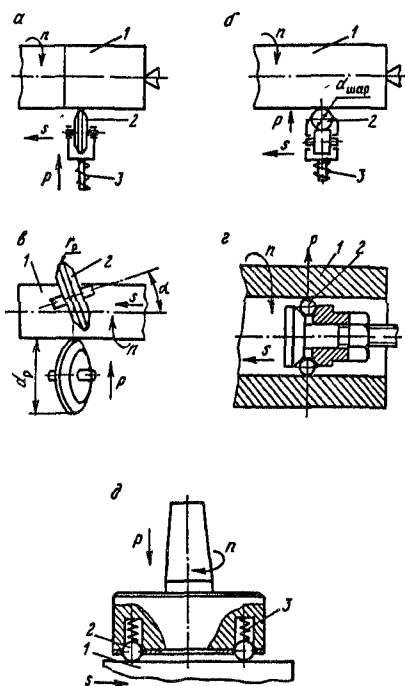


Рис. 2.37. Схемы обработки способами ППД с качением инструментов: 1 — заготовка; 2 — инструмент; 3 — пружина

от 0,03 до 0,1 мм. При повышении прочности стали в 1,5 раза примерно во столько же раз увеличивается требуемый натяг. После калибрования толстостенных деталей одним элементом на 25...30 % снижаются значение параметра Ra , погрешность формы и разброс значений диаметра отверстия.

Калибрование шарами не обеспечивает оптимальных условий деформирования, так как этот инструмент в условиях скольжения имеет относительно малую размерную стойкость. Однако шары широко применяются из-за простоты процесса обработки и возможности его автоматизации.

В зависимости от диаметра и назначения применяют одно- или многозубые дорны, которые снабжаются передним и задним направляющими элементами. Ширина b калибрующей части зуба (деформирующего элемента) зависит от диаметра D_3 отверстия: $b = 0,35 D_3$. Обработку обычно ведут дорном с несколькими деформирующими элементами. Наиболее эффективным с точки зрения точности является первый элемент (или проход). Для последующих элементов (проходов) выигрыш в качестве сокращается в геометрической прогрессии. Высота микронеровностей наиболее интенсивно снижается после первых трех-четырех деформирующих элементов.

В качестве смазочного материала при дорновании применяют сульфозфрезол (для стальных и бронзовых заготовок), керосин (для чугунных заготовок) и специальные смазочные материалы, например смесь 90% петролатума и 10% канифоли, которые обеспечивают жидкостное трение. Смазывание способствует повышению качества обработанной поверхности и снижению силы P дорнования. Силу дорнования можно уменьшить в несколько раз путем приложения к дорну, выглаживающей протяжке осевых колебаний (ударных импульсов) с частотой порядка 20 Гц и амплитудой 0,3...1,5 мм.

Скорость v осевого перемещения обрабатывающего инструмента зависит от материала заготовки: для стали и чугуна $v = 5...10$ м/мин, а при обильном охлаждении — до 15 м/мин; для цветных сплавов $v = 2...6$ м/мин, а при обильной подаче СОЖ скорость можно увеличить до 25 м/мин.

Выглаживание наружных и внутренних поверхностей вращения заготовок 1 можно осуществлять с помощью алмазных наконечников (рис. 2.36, *в*, *г*), состоящих из кристаллов алмаза 2 , закрепленных в корпусах, которые установлены в пружинные державки. Нагружающие пружины 3 обеспечивают непрерывный контакт сферы алмаза с обрабатываемой поверхностью и примерно одинаковую силу P выглаживания.

Алмазное выглаживание не рекомендуется для обработки прерывистых поверхностей, а также при значительных отклонениях

формы поверхности в поперечном сечении и твердости обрабатываемого материала. Разброс твердости HRC₉ не должен превышать четырех-пяти единиц.

Предварительную обработку поверхности под алмазное выглаживание выполняют тонким точением или шлифованием. Допустимая исходная шероховатость зависит от твердости заготовки и изменяется от Ra = 6,3 мкм (при твердости, меньшей 300 НВ) до Ra = 1,25 мкм (при твердости, большей 50 HRC₉). С увеличением твердости материала заготовки следует уменьшать радиус сферы выглаживающего алмаза, соответственно с 3 до 1 мм.

Сила P выглаживания возрастает с увеличением твердости материала заготовок и отношения r_c/D_3 , где r_c — радиус сферы выглаживающего алмаза, D_3 — диаметр обрабатываемой поверхности. Однако она не должна превышать 0,3 кН.

Подача s и скорость v выглаживания также зависят от твердости заготовки. Подача изменяется от 0,04...0,08 мм/об (при твердости, меньшей 300 НВ) до 0,02...0,05 мм/об (при твердости 30...60 HRC₉). Соответственно скорость изменяется от 10...80 м/мин до 200...280 м/мин.

Алмазное выглаживание осуществляется в один-два прохода. При этом наружный диаметр может уменьшиться (внутренний — увеличиться) на 1...15 мкм. При правильно подобранных параметрах режимов обработки значение параметра Ra может быть снижено до 0,16...0,04 мкм, микротвердость поверхности увеличена на 20...60%, толщина упрочненного слоя может достигать 400 мкм.

Обкатывание, раскатывание и накатывание поверхностей осуществляют роликами или шарами (см. рис. 2.37). Данными способами обычно обрабатывают цилиндрические и плоские поверхности, но иногда — канавки, галтели и фасонные поверхности (обычно фасонным роликом). Инструменты для накатывания условно можно разбить на жестко закрепленные и подпружиненные, находящиеся под действием пружин с предварительным натягом. Первые применяются сравнительно редко, так как не могут обеспечить равномерное рабочее усилие при значительных погрешностях формы и размера обрабатываемой поверхности. Этих недостатков лишены подпружиненные инструменты. В качестве упругого элемента в них чаще всего применяют спиральные пружины 3 (рис. 2.37, а, б, д), реже — тарельчатые. В некоторых случаях роль упругого элемента играет пружинящая часть корпуса.

Для обработки длинных поверхностей с малой жесткостью заготовки (или инструмента) применяют устройства с несколькими симметрично расположенными инструментами (рис. 2.37, в, г). Скрещивание осей роликов под углом α с осью вращения заготовки

обеспечивает ее самоподачу. Приспособление, схема которого показана на рис. 2.37, д, позволяет осуществлять накатывание плоских элементов плит и корпусных деталей на фрезерном станке.

Скорость v не оказывает заметного влияния на результаты накатывания, поэтому она назначается в пределах 30...150 м/мин. Подачу s при обкатывании роликом с круговым профилем назначают в пределах 0,07...0,6 мм/об в зависимости от радиуса r_p скругления ролика (5...40 мм), значений параметра шероховатости Ra исходной и обработанной поверхностей. При обкатывании шаром подачу можно определять по формуле

$$s = 0,067 \sqrt{d_{\text{шар}} Ra},$$

где $d_{\text{шар}}$ — диаметр шара, мм.

Радиальная сила P прижима рабочего элемента к обрабатываемой поверхности определяется так:

при обработке шаром

$$P = 3,6 ((D_3 d_{\text{шар}})/(D_3 + d_{\text{шар}}))^2;$$

при обработке роликом

$$P = 8,5 ((D_3 r_p)/(D_3 + 2r_p))^2 \sqrt{d_p/r_p},$$

где D_3 — диаметр заготовки; $d_{\text{шар}}$ — диаметр шара; r_p — радиус скругления ролика; d_p — его диаметр. Радиальная сила P изменяется в пределах 0,5...2 кН. С увеличением твердости радиальную силу следует увеличивать.

Для многоинструментных приспособлений подачу назначают так, чтобы на один инструмент приходилась подача $s_1 = 0,1...0,5$ мм для ролика и $s_1 = 0,01...0,05$ мм для шара. Тогда общая подача $s = s_1 k$, где k — количество инструментов.

2.14. Методы формообразования резьбы

2.14.1. Формообразование резьбы резанием

Классификация методов формообразования резьбы приведена на рис. 2.38. *Резьботочение* применяется в мелкосерийном и серийном (реже) производстве. Оно осуществляется резьбовым резцом, профиль которого соответствует требуемому профилю резьбы, за несколько проходов. Плоскость симметрии профиля резьбового резца должна быть перпендикулярна к оси вращения заготовки, а число его проходов зависит от шага резьбы.

Резьбофрезерование используется для формообразования резьб с крупным профилем (червяки, трапецидальные резьбы) и осуще-

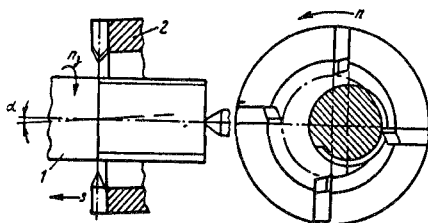
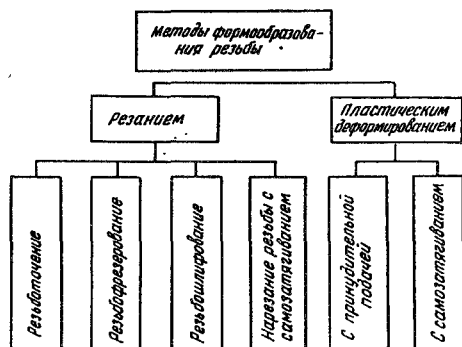


Рис. 2.39. Схема «вихревого» охватывающего фрезерования резьбы (n , n_3 — частоты вращения многорезцовой головки (фрезы) и заготовки; s — подача приспособления, равная шагу резьбы)

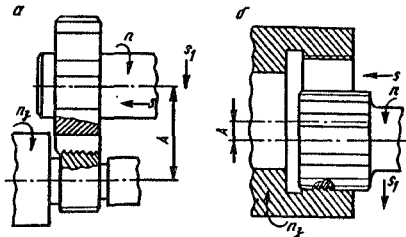


Рис. 2.40. Схемы фрезерования резьбы групповой (гребенчатой) фрезой на цилиндрических поверхностях: а — наружных; б — внутренних

ствляется на резьбофрезерных станках дисковыми фрезами. Ось фрезы скрещивается с осью заготовки под углом α , равным углу подъема резьбы по среднему диаметру. Такая наладка обеспечивает максимальную точность формы профиля резьбы. «Вихревое» охватывающее фрезерование резьб с крупным и нормальным шагом осуществляется на токарных станках (рис. 2.39) посредством приспособления с вращающейся многорезцовой головкой (фрезой) 2, установленного на суппорте вместо верхних поворотных салазок под углом α к оси заготовки 1.

Резьбы на крупных деталях, пересеченные шпоночными пазами или лысками, на тонкостенных деталях или деталях с ограниченным сбегом фрезеруют на резьбофрезерных станках с помощью групповых (гребенчатых) фрез (рис. 2.40), вращающихся с частотой n . Поперечная подача s_1 осуществляется до тех пор, пока не установится заданное межосевое расстояние A (полный профиль резьбы). Затем заготовка обрабатывается за время, соответствующее одному

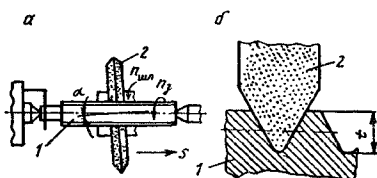


Рис. 2.41. Шлифование резьбы односторонним кругом:

а — схема обработки; б — положение круга в конце рабочего хода

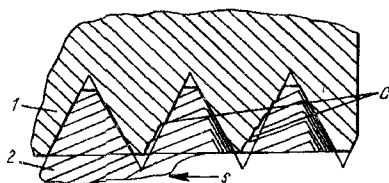


Рис. 2.42. Схема подрезания первых ниток резьбы при нарезании метчиком:

1 — заготовка (гайка); 2 — метчик (винт)

ее обороту. Продольная подача s связана с частотой вращения заготовки n_3 . Полный цикл обработки осуществляется за $1,1 \dots 1,2$ оборота заготовки. При фрезеровании внутренних резьб диаметр инструмента не может быть больше $0,75$ диаметра резьбы. Недостатком данного способа является относительно низкая точность формы профиля резьбы.

Резьбошлифование осуществляется чаще всего односторонним кругом (рис. 2.41), что обеспечивает максимальную точность формы профиля резьбы. При этом ось вращения круга 2 наклоняется относительно оси заготовки 1 на угол α , соответствующий углу подъема резьбы. Если шаг резьбы меньше 2 мм, то она шлифуется обычно «по целому», т. е. без предварительной обработки другими способами. В зависимости от шага и требований к точности резьбы резьбошлифование осуществляется за один или два прохода (предварительный и чистовой).

Особенностью нарезания резьбы самозатягиванием является то, что принудительная осевая подача инструмента или заготовки необходима только в начальный период обработки, пока инструмент не сформировал несколько первых (1...3) витков резьбы. Данный способ реализуется с помощью следующих инструментов: круглой плашки и резьбонарезной головки (для наружной резьбы); метчика и гайконарезной головки (для внутренней резьбы). Каждый из этих инструментов имеет заборную часть с формообразующими элементами, которые находятся на различных расстояниях от оси заготовки и вступают в работу постепенно, по мере относительного осевого перемещения инструмента и заготовки. Когда заборная часть инструмента создает в заготовке первые винтовые канавки (хотя и не полного профиля), образуется винтовая пара «винт—гайка» (рис. 2.42), которая в дальнейшем при наличии вращательного движения обеспечивает подачу (самозатягивание) на оборот заготовки (инструмента), равную шагу резьбы.

Следствием самозатягивания при нарезании резьбы метчиками и плашками является подрезание боковых сторон C профиля первых

нитек резьбы, обращенных в сторону, противоположную подаче (см. рис. 2.42), так как именно они воспринимают возрастающую по мере увеличения длины нарезаемой резьбы силу осевой подачи. Наиболее радикальным способом устранения этого отрицательного явления может быть создание контрсилы, направленной в сторону подачи и изменяемой по закону изменения силы осевой подачи. Эта контрсила должна действовать на инструмент. Такая сила создается в специальных державках наклонными пазами, в которых момент сопротивления резанию раскладывается на окружную и осевую составляющие.

При нарезании резьб в пластичных материалах рекомендуется применять метчики с вырезанной в шахматном порядке ниткой на калибрующей части или на всей длине, включая и заборную часть. Благодаря шахматному профилю нарезки нитки резьбы, подвергаемые в процессе резания упругим деформациям, не заклиниваются в витках инструмента.

Основной недостаток формообразования резьбы метчиками и плашками — необходимость их свинчивания по окончании нарезания, что снижает производительность процесса и качество резьбы. Этого недостатка лишены процессы формообразования внутренних резьб резьбонарезными головками (для резьб с диаметром больше 30 мм и наибольшим шагом 3 мм) и наружных резьб винторезными головками. Рабочие элементы этих головок (призматические или дисковые гребенки) в конце рабочего хода выходят из контакта с заготовкой (отводятся), а перед началом нарезания устанавливаются в рабочее положение ("взводятся"), причем эта трансформация головок может осуществляться автоматически. Кроме указанных преимуществ, каждая головка путем смены гребенок допускает нарезание резьбы в довольно широком диапазоне диаметров и шагов, а также позволяет регулировать средний диаметр нарезаемой резьбы. Конструкции головок нормализованы.

2.14.2. Формообразование резьбы пластическим деформированием

Наиболее производительным процессом формообразования резьбы с высокой степенью отделки и точности является холодное пластическое деформирование — накатывание (для наружной резьбы) и раскатывание (для внутренней). Кроме того, этот процесс существенно повышает усталостную прочность резьбы по сравнению с нарезанной.

Резьба может быть накатана (раскатана) на заготовках из любого пластичного металла. Сталь с относительным удлинением $\delta > 8\%$ и пределом прочности $\sigma_B \leq 800$ МПа (твердостью менее 20 HRC₃) хорошо накатывается, хотя можно накатывать резьбу на термически

обработанных заготовках из легированной стали с пределом прочности $\sigma_B \geq 1000$ МПа и твердостью ≤ 45 HRC₃. Можно накатывать резьбу на заготовках из бронзы, латуни, алюминиевых сплавов и т. д.

Технологически важным является размер заготовки под накатывание и раскатывание резьбы, так как он влияет не только на силы в процессе формообразования, но и на точность полученной резьбы. Если известны номинальный d , средний d_2 и внутренний d_1 диаметры треугольной резьбы и ее шаг S , то диаметр заготовки D_3 можно определить по формуле

$$D_3 = \sqrt{(A \operatorname{tg}(\alpha/2))/(3S) + (d^2 + d_1^2) / 2},$$

где $A = 3d_2(d^2 - d_1^2) - 2(d^3 - d_1^3)$; α — угол профиля резьбы. Данная формула получена из условия постоянства объема перераспределенного материала, но не учитывает его уплотнения, шероховатости поверхности заготовки, упругого восстановления (последствия) материала и удлинения заготовки (при накатывании). Поэтому полученный расчетом диаметр заготовки необходимо уточнить экспериментально.

Для определения диаметра заготовки под накатывание (раскатывание) метрической резьбы можно использовать более простые выражения:

для стержня

$$D_3 = d - kS; \quad (2.13)$$

для отверстия

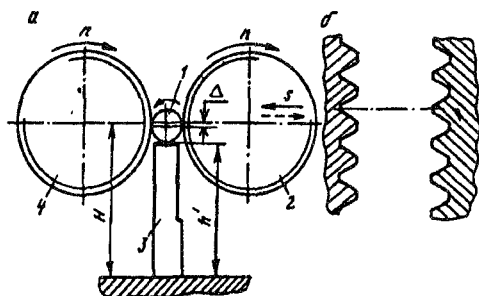
$$D_3 = d - 0,68 hS, \quad (2.14)$$

где k — коэффициент, зависящий от степени точности резьбы; S — шаг резьбы; h — отношение рабочей высоты витка внутренней резьбы к шагу. Значение k можно определить из табл. 2.29. Значение h изменяется от 0,72 до 0,56 и обеспечивает требования стандарта (ГОСТ 16093—81) по рабочей высоте витка резьбы, которая должна составлять 0,833...0,65 теоретической высоты. Допуск на диаметр отверстия под раскатывание можно принимать равным $0,1 \sqrt{S}$.

Табл. 2.29. Значение коэффициента k и допуск на диаметр заготовки

Степень точности резьбы	4h	6g	6e	8g
k	0,64	0,7	0,74	0,72
Допуск на диаметр стержня под накатывание	$0,04\sqrt{S}$	$0,06\sqrt{S}$	$0,06\sqrt{S}$	$0,06\sqrt{S}$

Рис. 2.43. Схемы накатывания двумя роликами (а) и осевой установки роликов (б)



В промышленности используют накатывание наружной резьбы с радиальной, тангенциальной и осевой подачами. С радиальной подачей наиболее часто осуществляют накатывание двумя роликами (рис. 2.43). Ролики 2 и 4 вращаются синхронно, причем ролик 2 получает радиальную подачу s с выдержкой времени (без перемещения) в ее конце. Заготовка 1 устанавливается на опорный нож 3. Высота установки ножа h' определяется по формуле

$$h' = H - (d_2/2 + \Delta),$$

где H — расстояние от оси роликов до опоры; d_2 — средний диаметр накатываемой резьбы; Δ — смещение осей заготовки и роликов, $\Delta = 0,2 \dots 0,3$ мм.

В осевом сечении ролики 2 и 4 имеют профиль, обратный профилю накатываемой резьбы. Резьба на роликах многозаходная. Число N заходов резьбы роликов определяется по формуле

$$N = N_{\text{рез}} D_2/d_2,$$

где $N_{\text{рез}}$ — число заходов накатываемой резьбы; D_2 — средний диаметр резьбы роликов.

Отношение D_2/d_2 должно быть целым числом. Не рекомендуется принимать $D_2/d_2 < 5$. Направление резьбы роликов противоположно направлению накатываемой резьбы. При наладке станка необходимо обеспечить осевое расположение ниток резьбы роликов, как это показано на рис. 2.43, б, что осуществляется обычно поворотом одного из роликов без поворота второго.

Накатывание резьбы с тангенциальной подачей осуществляется плоскими плашками (рис. 2.44), одна из которых (1) неподвижна, имеет заборную часть длиной l_1 , калибрующую часть и сбрасывающую часть длиной l_2 , а другая (2) совершает возвратно-поступательное движение. Неподвижная плашка короче подвижной, что исключает затягивание накатанной заготовки 3 при обратном ходе. При настройке станка следует обеспечить расстояние между плашками $t_1 = D_3$.

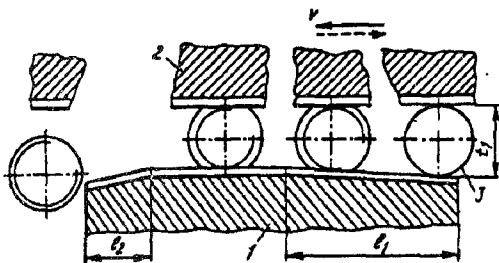
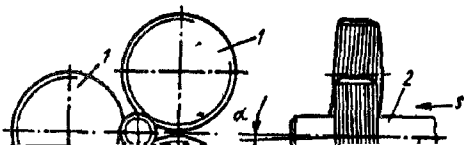


Рис. 2.44. Схема накатывания резьбы плоскими плашками



Для получения длинной наружной резьбы применяют накатывание с осевой подачей (самозатягиванием), один из вариантов которого показан на рис. 2.45. Диаметр роликов 1 с кольцевой нарезкой выбирается конструктивно, в процессе обработки они повернуты на угол α относительно оси заготовки 2, а их вращение не требует принудительной синхронизации. На каждом ролике нитки

создает лучшие условия для попадания смазочного материала в зону обработки. Граней может быть три-четыре, а для получения резьбы большего диаметра их может быть 6, 8 и более. В качестве кривой затылования рекомендуется спираль Архимеда. Чаще всего резьба формируется по всему профилю. Но иногда рекомендуют трехгранную форму, в которой резьба на раскатнике не затылуется. Хотя такая форма раскатника более технологична, но при ее использовании наблюдается увеличение крутящего момента.

2.15. Методы формообразования зубчатых венцов шестерен

2.15.1. Формообразование зубьев копированием

При *формообразовании копированием* рабочий профиль инструмента (фрезы, протяжки, шлифовального круга) соответствует профилю впадин между зубьями обрабатываемого венца.

Нарезание зубьев цилиндрических зубчатых колес модульными фрезами производится на универсальных фрезерных или специальных зубофрезерных станках с горизонтальными и вертикальными шпинделями. Как правило, модульные фрезы применяют для предварительного нарезания зубьев колес средних модулей и окончательной обработки зубьев колес крупных модулей. После нарезания одной впадины заготовка с помощью делительного механизма поворачивается на один шаг (деление на угол φ) и фреза нарезает следующую впадину.

Как известно, профиль зуба зависит не только от модуля, но и от числа зубьев колеса. Чтобы уменьшить номенклатуру модульных фрез, для каждого модуля изготавливают определенный (8, 15 или 26 шт.) комплект. Каждая фреза комплекта предназначена для обработки зубчатых колес определенного модуля и диапазона чисел зубьев. Профиль ее зуба точно соответствует профилю впадины только для одного числа зубьев из соответствующего диапазона, для остальных он приближенный. Чем больше фрез в комплекте, тем меньше отклонения профиля. Поэтому комплект из 8 фрез позволяет получать зубчатые венцы 9-й степени точности, а для изготовления более точных зубчатых колес требуется комплект из 15 или 26 фрез. Источниками погрешностей изготовления зубчатых венцов данным способом являются приближенность профиля инструмента и погрешности механизма делительной головки.

Производительность при формообразовании модульными дисковыми фрезами снижается из-за затрат времени на врезание и холостые перемещения при прорезании каждой впадины. Однако преимуществом данного формообразования является относительно низкая стоимость инструмента и возможность выполнения работы

на универсальных фрезерных станках. При нарезании косозубых колес дисковыми фрезами профиль зуба колеса приближается к эвольвентному в нормальном сечении, а не в торцовом, как при нарезании зубьев другими способами. Поэтому если одно из пары косозубых колес нарезано дисковой модульной фрезой, то и другое должно быть нарезано таким же инструментом.

Концевыми модульными фрезами нарезают зубья средне- и крупномодульных цилиндрических колес, шевронных колес, реек и т. д. Зубья крупных модулей (более 20 мм) предварительно обрабатываются концевой угловой фрезой, а окончательно — модульной. В случае необходимости на универсальном фрезерном станке модульной фрезой можно нарезать коническое прямозубое колесо. Для этого его заготовку устанавливают в делительной головке так, чтобы дно впадины между зубьями стало горизонтально. Зубья обычно нарезаются за три этапа. На первом фрезеруются впадины минимальной ширины модульной фрезой, профиль которой соответствует профилю зубьев на минимальном диаметре колеса. На втором и третьем этапах обработка осуществляется модульной фрезой, профиль которой соответствует максимальному диаметру колеса. При этом стол станка поворачивается на угол $\pm\alpha_1$, который соответствует сужению впадины. На втором этапе фрезеруются левые, а на третьем — правые стороны зубьев. Однако данный способ формообразования малопроизводителен и обеспечивает точность, соответствующую только 10-й степени.

Для обработки прямых зубьев конических зубчатых колес в крупносерийном производстве применяют высокопроизводительный способ кругового координатного протягивания (рис. 2.46, а), который реализуется на специальных зубопротяжных станках. Режущим инструментом служит

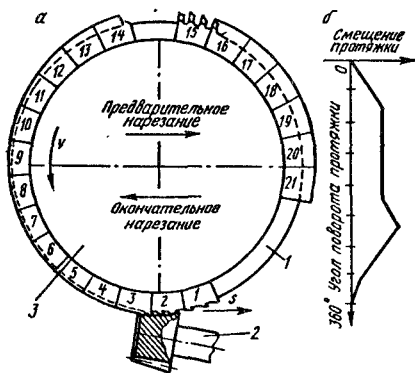


Рис. 2.46. Схема кругового протягивания зубьев конического колеса

инструментом служит круговая протяжка 3, состоящая из секций фасонных резцов. Резцы с изменяющимся профилем расположены в последовательном порядке для предварительной и окончательной обработки заготовки 2. Протяжка вращается с постоянной скоростью v и в то же время совершает поступательное движение подачи s , значение

которой различно на отдельных участках проходимого пути, т. е. зависит от координаты оси протяжки (рис. 2.46, б). Поворот заготовки 2 на угловой шаг (деление) производится в то время, когда над ней находится сектор 1, не заполненный резцами. При этом вращение протяжки и ее подача в исходное положение не прекращаются. Цикл обработки одной впадины составляет от 2 до 6 с. Данный способ обеспечивает 7-ю степень точности обработанных колес и параметр шероховатости $Ra \leq 6,3$ мкм на боковых сторонах профиля зубьев. Примерно по такой же схеме осуществляется круговое протягивание впадин цилиндрических прямозубых колес. Только в последнем случае осевую подачу s совершает заготовка.

Шлифование копированием более производительно, чем обкаткой, но зато менее точно. Оно применяется в массовом и крупносерийном производстве. Относительно невысокая точность объясняется главным образом размерным износом шлифовального круга. Профиль шлифовального круга, соответствующий профилю впадины, формируется правкой алмазно-металлическими карандашами по копиру или алмазным роликом. Точность, достигаемая этим способом, соответствует 6-й степени, а шероховатость обработанной поверхности по параметру Ra — 1,25 мкм.

2.15.2. Формообразование зубьев обкаткой

Самым распространенным формообразованием зубьев цилиндрических колес является зубонарезание модульными червячными фрезами (рис. 2.47). Этот способ универсален (фрезой одного модуля можно нарезать зубья на колесах с разным их числом), достаточно производителен и обеспечивает 7-ю и 8-ю степени точности зубчатого венца. Для обработки колес 7-й степени точности применяются прецизионные червячные модульные фрезы класса АА, а для 8-й и 9-й — соответственно классов точности А и В.

Зубофрезерование с осевой подачей фрез 1 применяются для нарезания цилиндрических колес 2 с прямыми и винтовыми зубьями (рис. 2.47, а). Недостатком этого способа является большая доля врезания в рабочем ходе червячной фрезы. При обработке колес с прямыми зубьями длина рабочего хода

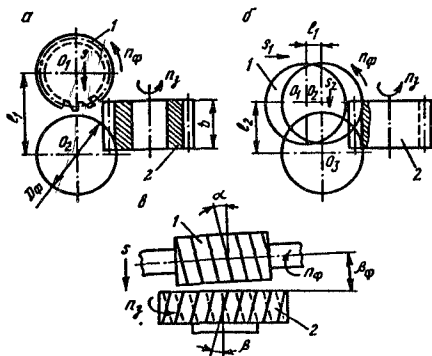


Рис. 2.47. Схемы фрезерования зубьев цилиндрических колес червячной модульной фрезой

$$l_1 = b + \sqrt{D_{\text{ф}}b - b^2} + (2\dots 3),$$

где b — ширина нарезаемой заготовки (или пакета заготовок); $D_{\text{ф}}$ — наружный диаметр фрезы.

При фрезеровании колес с винтовыми зубьями в эту формулу вместо $D_{\text{ф}}$ следует подставить

$$D = D_{\text{ф}} (1 - \text{tg}^2 \beta + D_3 \text{tg}^2 \beta),$$

где β — угол наклона зубьев; D_3 — наружный диаметр заготовки.

Длина и время врезания существенно снижаются при зубофрезеровании с радиально-осевой подачей (рис. 2.47, б), когда червячная фреза в начале обработки и до получения полной высоты зуба получает радиальную подачу $s_1 = (0,3\dots 0,5)s_2$, где s_2 — осевая подача, которая включается после выключения радиальной. Этот способ экономичен при обработке заготовок зубчатых колес с большим углом наклона зубьев и при работе червячными фрезами большого диаметра. Он осуществляется на специальных зубофрезерных станках.

При зубофрезеровании цилиндрических колес ось червячной фрезы наклоняется под углом $\beta_{\text{ф}}$ так, чтобы в зоне обработки касательная к витку ее резьбы была параллельна зубу обрабатываемой заготовки (рис. 2.47, в), т. е. $\beta_{\text{ф}} = \alpha + \beta$, если направления витков на червячной фрезе и спирали на обрабатываемой заготовке различны, и $\beta_{\text{ф}} = \alpha - \beta$, если фреза и спираль нарезаемого колеса одинаково право- или левозаходные.

Для повышения точности зубофрезерования и уменьшения шероховатости обработанной поверхности, а также увеличения стойкости червячной фрезы рекомендуется перемещать инструмент вдоль оси из расчета 0,2 мкм за 1 оборот. Это перемещение может осуществляться на современных станках автоматически: после нарезания определенного числа заготовок; после каждого цикла зубофрезерования; непрерывно при работе фрезы.

Повышение производительности при зубофрезеровании достигается: 1) применением сборных червячных фрез увеличенного диаметра с увеличенным диаметром посадочного отверстия, благодаря чему можно работать с повышенными режимами резания; 2) использованием попутного направления осевой подачи; 3) применением радиального врезания фрезы, особенно при обработке узких колес (см. рис. 2.47, б); 4) нарезанием нескольких зубчатых колес на одной оправке (пакетом).

Предварительное нарезание зубьев колес червячными фрезами необходимо выполнять за один проход, и только если мощность станка недостаточна — за два прохода. При этом колеса с четным

числом зубьев надо нарезать однозаходными фрезами, а с нечетным числом зубьев — двухзаходными, что приведет к уменьшению погрешности окружного шага.

Схемы нарезания червячных зубчатых колес червячными модульными фрезами 1 показаны на рис. 2.48. В данном случае

$\beta_{\phi} = 0$, а нарезание мож-

но осуществлять либо с радиальной $s_{\text{рад}}$ (рис. 2.48, а), либо с тангенциальной $s_{\text{прод}}$ (рис. 2.48, б) подачей. Первый способ наиболее распространен, а второй применяют главным образом для нарезания заготовок 2 червячных зубчатых колес, работающих в паре с многозаходными червяками. При нарезании способом тангенциальной подачи получается более точный профиль, но стоимость фрезы существенно выше обычной и требуется наличие на станке специального протяжного суппорта. Кроме того, за счет большей длины рабочего хода производительность способа обработки с тангенциальной подачей ниже, чем с радиальной.

Лучшими показателями обладает способ нарезания червячных зубчатых колес с радиально-тангенциальной подачей, когда предварительная обработка осуществляется заборной частью фрезы при ее внедрении на радиальной подаче до достижения номинального межосевого расстояния, а затем производится автоматическое переключение на чистовую обработку с тангенциальной подачей.

Цилиндрические зубчатые колеса можно нарезать на зубострогальных станках зубчатой рейкой 1 (рис. 2.49, а) и на долбежных станках круглыми модульными долбяками 1 (рис. 2.49, б, в). Нарезание зубьев у заготовок 2 зуб-

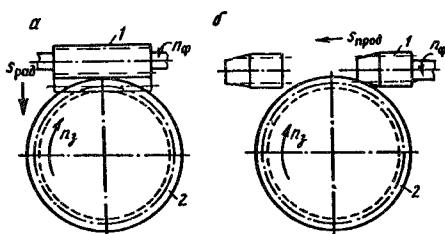


Рис. 2.48. Схемы обработки зубьев червячных зубчатых колес модульной червячной фрезой

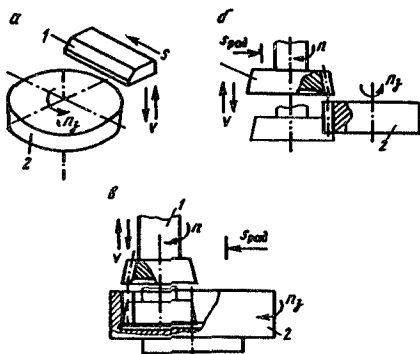


Рис. 2.49. Схемы обработки зубьев цилиндрических зубчатых колес модульными долбяками: 1 — инструмент; 2 — заготовка

чатой рейкой менее производительно, чем модульным долбяком, и поэтому применяется редко. Способ обработки модульными долбяками более универсален, чем зубофрезерование червячными модульными фрезами, так как его можно использовать для нарезания зубчатых колес внешнего и внутреннего зацеплений с прямыми и косыми зубьями. А блочные колеса с близко расположенными венцами и шевронные колеса можно нарезать только модульными долбяками. Для нарезания косозубых колес внешнего зацепления долбяк должен быть тоже косозубым с тем же углом наклона, но с противоположным направлением. Кроме того, долбяк должен получать дополнительное возвратно-вращательное движение от специального копира с винтовыми направляющими. Направление винтовых направляющих копира совпадает с направлением зубьев долбяка, а их шаг H (ход) равен шагу винтовой линии долбяка, зависящему от угла наклона его зубьев и диаметра делительной окружности.

Число переходов при зубодолблении зависит от модуля, материала заготовки и требуемой точности. Зубчатые колеса с модулем 2...3 мм обрабатывают за два перехода с одной установки (один предварительный и один чистовой), а с модулем 3...6 мм — за три перехода (два предварительных и один чистовой).

Нарезание шевронных зубчатых колес осуществляется на горизонтальных станках двумя спаренными косозубыми долбяками с правым и левым наклоном зубьев. Долбяки со специальной заточкой могут нарезать зубья шевронного колеса без разделительной канавки.

Зубострогание является наиболее простым способом формообразования прямозубых конических зубчатых венцов. Благодаря универсальности и несложной конструкции режущего инструмента этот способ получил широкое распространение в единичном и серийном производстве. В основу способа положено станочное зацепление обрабатываемого колеса 1 (рис. 2.50) с воображаемым производящим колесом 4, роль зубьев которого выполняют зубострогальные

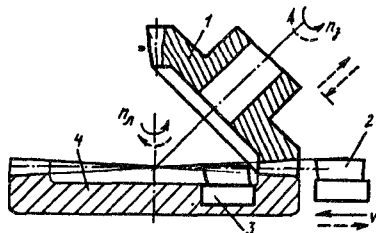


Рис. 2.50. Схема строгания зубьев конического прямозубого колеса

резцы 2 и 3. При обработке зубострогальные резцы, установленные в резцодержателях ползунов, получают возвратно-поступательное движение, необходимое для резания со скоростью v . Для движения обкатки согласовывают частоты вращения заготовки (n_3) и люльки станка (n_4). Конические колеса с модулем до 4 мм

нарезают зубостроганием из целой заготовки за одну операцию, а с модулем свыше 4 мм — за две (предварительную и чистовую).

Предварительное нарезание зубьев можно производить как обкаткой, так и врезанием. Последнее является более экономичным и простым, так как из-за отсутствия огибания длина рабочего хода существенно снижается. Припуск (на обе стороны зуба) под чистовое зубострогание зависит от модуля. Для групп значений модуля m принимаются следующие значения припуска P (чистовое строгание):

m , мм.....	2...3	3,5...5	5,5...7	8...10	11...12
P , мм.....	0,5	0,7	0,8	1,0	1,2

После формообразования каждого зуба станок автоматически производит деление, для чего заготовка выходит из зацепления с инструментом, а люлька с резцами возвращается в исходное положение. Затем осуществляется поворот заготовки (деление) для обработки следующего зуба.

На зубострогальных станках нормальной точности обрабатывают колеса до 7-й и 8-й степеней точности, а на станках повышенной точности — до 6-й, 7-й.

Нарезание конических колес с круговыми зубьями осуществляется обкаткой и врезанием (предварительная обработка). При реализации обкатки зубья резцовой головки 1 (рис. 2.51) играют роль зуба воображаемого производящего колеса 2, которое вращается с частотой n и «находится» в зацеплении с обрабатываемой заготовкой 3. В конце цикла формообразования впадины заготовка отводится от инструмента, люлька с резцовой головкой возвращается в исходное положение, а заготовка поворачивается на один зуб (деление).

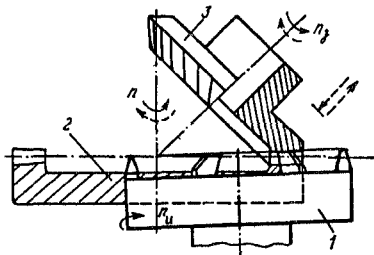


Рис. 2.51. Схема нарезания круговых зубьев конических колес (n_1 — частота вращения резцовой головки)

При осуществлении врезания обрабатываемая заготовка 3 неподвижна, а резцовой головке сообщается рабочая подача вдоль собственной оси. По достижении требуемой глубины впадины заготовка отводится от резцовой головки и поворачивается на шаг для обработки следующего зуба.

При осуществлении врезания обрабатываемая заготовка 3 неподвижна, а резцовой головке сообщается рабочая подача вдоль собственной оси. По достижении требуемой глубины впадины заготовка отводится от резцовой головки и поворачивается на шаг для обработки следующего зуба.

Конические колеса с модулем до 2,5 мм обрабатываются окончательно из сплошной заготовки, а с большим модулем — за два перехода. После чистовой обработки получают колеса 6...8-й степеней точности. Значения припуска под чистовую обработку указаны выше.

2.15.3. Отделка зубьев обкаткой

Зубошевингование дисковым шевером является наиболее распространенным способом чистовой обработки зубьев незакаленных (твердость до 32...34 HRC₃) цилиндрических колес с внешним или внутренним зацеплением после зубофрезерования либо зубодолбления. Шевингование повышает точность на одну-две степени. Оно может обеспечить 6...8-ю степени точности и параметр шероховатости $Ra = 0,8...2$ мкм. Точность, достигаемая шевингованием, зависит как от точности предварительной обработки, так и от коэффициента перекрытия шевера с обрабатываемым колесом, который должен быть больше 1,6.

Шевингование позволяет выполнять продольную и профильную модификации зуба. Продольная модификация обеспечивает бочкообразную форму зуба с целью исключения концентрации нагрузки на его концах. Модификация эвольвентного профиля зуба позволяет уменьшать уровень шума и повышать долговечность передачи.

Схема одного из способов шевингования (*параллельного*) показана на рис. 2.52, где 1 — шевер, 2 — обрабатываемая заготовка. В процессе шевингования шевер и обрабатываемое колесо находятся в плотном зацеплении, а их оси скрещиваются. Кромки нанесенных на боковую поверхность зубьев шевера мелких канавок (глубина и ширина примерно по 0,8 мм) являются режущими и снимают тонкую волосовидную стружку толщиной 1...5 мкм.

При совместном вращении шевера и колеса вследствие скрещивания их осей возникает скольжение профилей вдоль зуба, скорость которого в данном случае и является скоростью резания. Кроме того, обрабатываемое колесо совершает возвратно-поступательное движение параллельно своей оси ($s_{\text{прод}}$), и в конце каждого хода

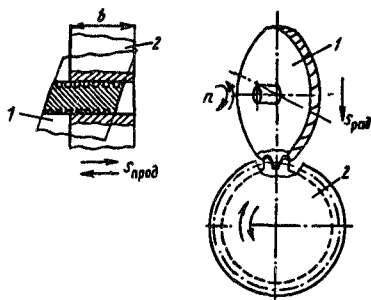


Рис. 2.52. Схема параллельного шевингования цилиндрического зубчатого колеса

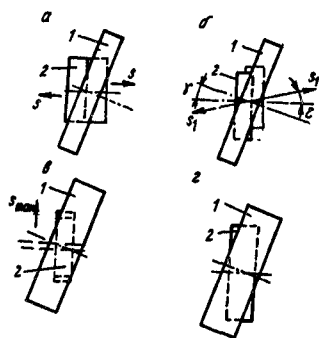


Рис. 2.53. Схемы способов шевингования

шеверу (или заготовке) сообщается ступенчатая радиальная подача ($s_{\text{рад}}$). Несколько последних возвратно-поступательных ходов совершаются без радиальной подачи (калибрование). Длина хода с подачей $s_{\text{прод}}$ составляет $l = b + m$, где b — ширина зубчатого венца заготовки; m — модуль.

Другие способы шевингования (рис. 2.53, а) отличаются от параллельного направлением подачи s и конструкцией шевера. При *диагональном шевинговании* обрабатываемое колесо 2 совершает возвратно-поступательное движение (s_1) под углом ϵ к своей оси (рис. 2.53, б), благодаря чему длина хода становится меньше ширины зубчатого колеса. Ширина зубчатого венца обычно больше ширины шевера l . Угол γ скрещивания осей и угол ϵ диагонали (направление подачи) находятся в следующей зависимости:

$$\operatorname{tg} \epsilon = (0,8 B \sin \gamma) / (b - 0,8 B \cos \gamma),$$

где B — ширина шевера; b — ширина зубчатого венца.

Лучшие условия для резания имеют место при $\epsilon = 35 \dots 40^\circ$. Угол $\epsilon < 20^\circ$ не рекомендуется. Точка скрещивания осей в процессе подачи перемещается по всей ширине шевера, что обеспечивает равномерное изнашивание и повышенную по сравнению с параллельным шевингованием стойкость шевера. Другим преимуществом диагонального шевингования является уменьшение длины рабочего хода стола, что позволяет повышать производительность процесса (до 50%).

При *тангенциальном шевинговании* (рис. 2.53, в) подача $s_{\text{тан}}$ стола осуществляется в направлении, перпендикулярном к оси заготовки. Ширина шевера l больше ширины колеса 2, а его режущие зубцы смещают относительно торца по винтовой линии. Обработка заготовки осуществляется за один двойной ход при неизменном межосевом расстоянии. Тангенциальный способ шевингования более производителен, чем перечисленные ранее, и обычно применяется для обработки узких зубчатых венцов и блочных колес с полуоткрытыми венцами.

При *врезном шевинговании* (рис. 2.53, г) шевер 1 осуществляет радиальную подачу, а стол с заготовкой не перемещается. Вся поверхность зубьев колеса обрабатывается одновременно, для чего зубья шевера в продольном направлении имеют вогнутость, а режущие зубцы располагаются по винтовой линии. Последний способ применяют в массовом производстве, так как его производительность в 2...4 раза выше, чем при диагональном шевинговании, но шевер является специальным инструментом.

Зубчатые колеса внутреннего зацепления шевингуют на специальных станках. Угол скрещивания осей — около 3° . Зубья шевера

имеют небольшую бочкообразность. Применяются способы параллельного и врезного шевингования.

Припуск Π под шевингование можно определить следующим образом:

$$\Pi = 0,04 + 0,01 m,$$

где m — модуль.

Зубошлифование является наиболее надежным способом обеспечения высокой точности закаленных зубчатых колес, так как его результат мало зависит от погрешности предыдущей обработки, коробления при термической обработке и припуска. Основным недостатком этого способа является относительно низкая производительность. На рис. 2.54 и 2.55 показаны схемы основных способов шлифования зубьев цилиндрических колес. Достаточно точным (5-я степень) и наиболее производительным является шлифование червячным кругом. Шлифование дисковым коническим кругом методом обкатки с делением обеспечивает хорошую точность, достаточно универсально и поэтому широко применяется в мелкосерийном производстве. Наибольшую точность (4-я степень) обеспечивает шлифование зубьев тарельчатыми кругами по методу обкатки с делением. Последний метод достаточно универсален, но наименее производителен из рассмотренных. Так как разместить два круга во впадине между зубьями с модулем меньше 9 мм невозможно, то в таких колесах одновременно шлифуются разноименные стороны двух соседних впадин. На рис. 2.54 не показано движение продольной подачи вдоль образующей зуба. Но шлифование зубьев узких колес двумя тарельчатыми кругами большого (700..800 мм) диаметра может осуществляться без этой подачи, что существенно повышает производительность.

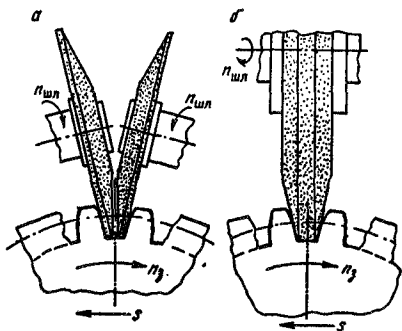


Рис. 2.54. Схемы шлифования зубьев цилиндрических колес тарельчатыми (а) и дисковыми (б) кругами

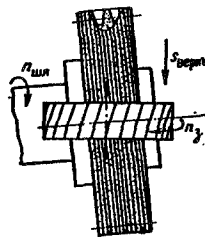


Рис. 2.55. Схема шлифования зубьев цилиндрического колеса червячным кругом

Круговые зубья конических колес шлифуют чашечным кругом, форма боковых рабочих поверхностей которого тождественна форме боковых сторон зубьев воображаемого исходного колеса 2 (см. рис. 2.51). Схема обработки при шлифовании аналогична схеме нарезания зубьев резцовою головкой.

Припуск на шлифование зубьев зависит от модуля и диаметра колеса и изменяется от 0,15 мм ($m < 3, d < 100$) до 0,5 мм ($3 < m < 10, 100 < d \leq 300$).

Для повышения долговечности и плавности ответственных передач, а также для уменьшения уровня шума применяется притирка зубчатых колес, которая позволяет снижать отклонения профиля, уменьшать значение параметра шероховатости в 2...4 раза. Притирка колес 6-й степени точности и средних габаритов рентабельна при соблюдении следующих условий: 1) колеса, подготовленные под притирку, должны иметь точность до 7-й степени включительно; 2) припуск на притирку по толщине зуба не должен превышать 0,05 мм.

Притирку осуществляют на специальных станках (реже в рабочем корпусе) в зацеплении со специальным чугунным зубчатым колесом или в паре с сопрягаемым колесом (приработка) при окружной силе 10...20 Н на 1 см ширины колеса. На притирочных станках притирка цилиндрических колес осуществляется либо при параллельных, либо при перекрещивающихся осях изделия и притира (как при шевинговании). Кроме вращения, притиру сообщается медленное осевое движение подачи. Длина зубьев притира принимается на 4...8 мм больше длины зубьев притираемого колеса. При притирке в зону зацепления подается притирочная паста, состоящая из абразивного порошка (электрокорунда) зернистостью 5...10 и вазелиновой или масляной связки. Продолжительность притирки составляет 5...6 мин.

2.15.4. Режимы резания при формообразовании зубчатых поверхностей

Цилиндрические зубчатые колеса

1. **Зубофрезерование червячными модульными фрезами.** При предварительной обработке назначается продольная подача $s = 1,5...4$ мм на оборот заготовки. Значение подачи зависит от мощности станка, числа заходов фрезы, модуля, угла наклона зуба, материала и твердости заготовки. Увеличение мощности значительно увеличивает s , а модуля и твердости — незначительно. Для чугунных заготовок подача на 20% выше, чем для стальных. При увеличении угла наклона зубьев от 0 до 55° подача линейно уменьшается в 2 раза.

Несколько уменьшается подача при увеличении числа заходов фрезы.

При чистовой обработке подача зависит от требований к шероховатости:

Ra , мкм.....	1,25	2,5	5
s , мм/об.....	0,5	1	2

Скорость резания для фрез из быстрорежущих сталей принимается в пределах 30...65 м/мин. Скорость резания обратно пропорциональна подаче и незначительно уменьшается при увеличении угла наклона зубьев.

2. Зубофрезерование дисковыми и модульными фрезами. Продольная подача $s = 1...2,5$ мм на оборот фрезы. Скорость резания фрезами из быстрорежущих сталей $v = 15...30$ м/мин.

3. Зубофрезерование концевыми и модульными фрезами. Способ применяется при $m \geq 8$. Продольная подача выбирается в пределах 0,06...0,25 мм на оборот фрезы. Для чистовой обработки подачу уменьшают на 40%. С увеличением угла β наклона зуба подача уменьшается путем умножения ее рекомендуемых выше значений на K_s :

β , град.....	0	30	60
K_s	1	0,85	0,5

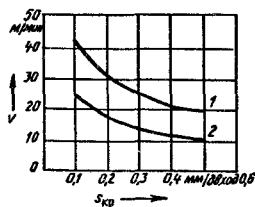
Скорость резания фрезами из быстрорежущих сталей 25...32 м/мин.

4. Зубодолбление дисковыми долбяками. Зависимость средних значений глубины резания t и круговой подачи $s_{кр}$ от модуля m приведена в табл. 2.30. С увеличением твердости заготовки круговая подача несколько снижается. Радиальная подача $s_{рад}$ связана с круговой $s_{кр}$ следующим выражением: $s_{рад} = (0,1...0,3) s_{кр}$.

Табл. 2.30. Элементы режима зубодолбления

Модуль m , мм	Вид зубодолбления				
	предварительное	получистовое		чистовое	
		$s_{кр}$, мм/дв. ход	t , мм	$s_{кр}$, мм/дв. ход	t , мм	$s_{кр}$, мм/дв. ход
2...3	—	—	—	—	0,25
4...6	0,35	—	—	0,65	0,22
8...12	0,35	3,5	0,35	0,9	0,175

Рис. 2.56. Зависимость скорости резания при зубодолблении от круговой подачи s_k и модуля m :
 1 — для $m = 2$ мм; 2 — для $m = 8$ мм



Скорость резания в зависимости от $s_{кр}$ и модуля выбирается в пределах 15...45 м/мин (рис. 2.56).

5. Зубошевигование дисковыми шеверами. Осевая подача стола выбирается в пределах 0,2...0,6 мм на оборот заготовки; радиальная подача шевера $s_{зад} = 0,02...0,4$ мм на продольный ход стола. Число проходов с подачей — от 2 до 10, а без подачи — от 2 до 4. Скорость на делительной окружности заготовки $v_{ок} = 90...220$ м/мин.

6. Зубошлифование методом обкатки. Скорость шлифовального круга $v_{кр} = 25...35$ м/с. Радиальная подача (условная глубина) $s_{рад} = 0,04...0,1$ мм на двойной ход. Продольная подача $s_{прод} = 10...20$ м/мин. Окружная подача s (обкатывания) в зависимости от требований к шероховатости выбирается в следующих пределах:

Ra , мкм.....	0,32	0,63	1,25
s , мм/ход	0,16...0,4	0,3...0,9	0,6...1,8

7. Зубошлифование профилированным кругом. Радиальная подача $s_{рад} = 0,04...0,2$ мм на ход суппорта станка. Продольная подача при предварительном шлифовании $s_{прод} = 10...12$ м/мин, а при чистовом $s_{прод} = 7...9$ м/мин.

Червячные колеса

1. Зубофрезерование червячной фрезой. Подача выбирается в пределах 0,4...1,6 мм на оборот заготовки в соответствии с графиком, приведенным на рис. 2.57. Скорость резания $v = 20...26$ м/мин. В зависимости от модуля m выбирается припуск Π :

m , мм	1...2	2...4	4...6	6...8
Π , мм:				
под чистовое фрезерование	0,25	0,3	0,5	0,7
под шевигование	0,08	0,12	0,17	0,22

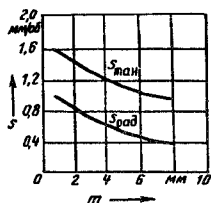


Рис. 2.57. Зависимость радиальной $s_{рад}$ и тангенциальной $s_{тан}$ подач при зубофрезеровании червячных колес от модуля m

2. Ш е в и н г о в а н и е ч е р в я ч н ы м ш е в е р о м. Скорость резания $v = 2...4$ м/мин. Радиальная подача $s_{рад} = 0,01...0,04$ мм на оборот заготовки.

Конические колеса с прямым зубом

В зависимости от требуемой точности по табл. 2.31 выбирается способ обработки зубчатого венца. Число переходов зубострогания зависит от модуля: при $m \leq 3$ выполняется один переход, а при $m > 3$ — два. Припуск Π по толщине зуба под чистовое зубострогание зависит от модуля m :

m , мм	2...3	3...6	6...10
Π , мм	0,5	0,9	1,1

Табл. 2.31. Способы обработки конического зубчатого венца с прямыми зубьями

Степень точности	Параметр шероховатости Ra , мкм	Наименование способа обработки
7...8	1,2...2,5	Зубострогание обкаткой
10	5...10	Фрезерование концевой модульной фрезой
9	2,5...5	Протягивание круговой протяжкой

Окружная подача (обката) $s_{ок} = 0,15...0,3$ мм на двойной ход. Она увеличивается в указанных пределах при увеличении числа зубьев и снижается при увеличении модуля. Обычно окружная подача задается в секундах на обработку одного зуба.

При предварительном зубострогании скорость резания $v = 12...25$ м/мин, а при окончательном $v = 15...32$ м/мин. При круговом протягивании зубчатого венца скорость резания $v = 15...57$ м/мин,

причем предварительное протягивание ведется при $v = 35...55$ м/мин, а окончательное — при $v = 25...40$ м/мин. Время обработки одного зуба составляет 3...10 с.

Конические колеса с круговым зубом

Обработка ведется в два перехода. Припуск P под чистовую обработку зависит от модуля m :

m , мм	2...3	3...5	5...7	7...10
P , мм	0,5	0,7	0,8	1

Подача на зуб зуборезной головки $s_z = 0,05...0,075$ мм. Скорость резания $v = 30...60$ м/мин. Время обработки одного зуба составляет 17...57 с.

2.16. Электрическая обработка

В зависимости от преимущественного характера воздействия электрического тока (электромагнитного поля) электрическая размерная обработка делится на: 1) электроэрозионную (тепловое воздействие); 2) электрохимическую (химическое воздействие); 3) ультразвуковую (механическое воздействие поля).

К *электроэрозионным* относятся разнообразные способы обработки, в которых отделение материала заготовки осуществляется под воздействием теплоты, выделяющейся в результате электрического импульсного разряда. В зависимости от длительности импульса, вырабатываемого источником тока, и способа его формирования различают электроискровой, электроимпульсный и электроконтактный способы обработки.

К достоинствам электроэрозионной обработки относятся: возможность обрабатывать токопроводящие материалы любой твердости, вязкости, хрупкости; возможность обрабатывать заготовки сложных форм, даже таких, которые невозможно получить другими способами (например, прошивание отверстий с криволинейной осью); отсутствие необходимости в высокой прочности и твердости инструмента; отсутствие механических воздействий на заготовку и инструмент; возможность получать поверхности с различными параметрами качества; значительное снижение трудоемкости обработки сложных поверхностей заготовок из труднообрабатываемых материалов.

К недостаткам электроэрозионной обработки можно отнести: обратную зависимость между производительностью и качеством обработанной поверхности; необходимость вести обработку при погружении заготовки в жидкость; относительно низкую производительность при обработке материалов невысокой твердости (сталь, цветные сплавы).

Удаление материала при размерной *электрохимической обработке* происходит под действием электрического тока в среде электролита без непосредственного контакта между инструментом и заготовкой. В основе этого процесса лежит явление анодного растворения металлов в движущемся (проточном) электролите.

К основным достоинствам электрохимической размерной обработки относятся: высокая производительность, достигающая десятков тысяч кубических миллиметров в минуту и принципиально не имеющая ограничений; полное отсутствие износа электрода-инструмента; возможность повышения качества и производительности, что не характерно для других механических или электрических способов обработки; высокое качество обработанной поверхности; наличие некоторого саморегулирования процесса при обработке заготовок из сплавов неоднородного кристаллического строения, приводящего к равномерному растворению материала с их поверхности.

К недостаткам процесса относятся: высокая энергоемкость; необходимость принятия специальных мер для удаления отходов (шлама и газов); затруднения в управлении процессом при обработке сложнопрофильных деталей с высокой точностью; необходимость обеспечения интенсивной циркуляции электролита в процессе обработки; некоторое снижение выхода по току при возрастании плотности тока.

При *ультразвуковой обработке* электрическая энергия с помощью пьезо- или магнитострикционных элементов преобразуется в энергию упругих волн, которые распространяются в твердых, жидких и газообразных средах. Удаление материала происходит за счет движения зерен абразивной суспензии в пространстве между колеблющимся инструментом и обрабатываемой поверхностью. При этом абразивные зерна получают энергию от инструмента, колеблющегося с ультразвуковой частотой. Обычно при размерной обработке используют продольные колебания инструмента, реже — поперечные и крутильные. Кавитация и акустические течения, возникающие под инструментом в суспензии абразива в результате воздействия ультразвуковых колебаний, способствуют перемешиванию абразива в рабочем промежутке, выносу абразива и отделенных частиц материала обрабатываемой заготовки, подаче свежего абразива в зону обработки.

Основные достоинства ультразвуковой обработки: возможность размерной обработки заготовок из твердых и хрупких материалов (керамика, ситаллы, кремний, германий); сравнительная несложность эксплуатации промышленных установок. К недостаткам относятся: повышенная стоимость акустической энергии; необходимость изготовления специальных установок и аппаратов для генерации ультразвуковых колебаний, их передачи и распределения.

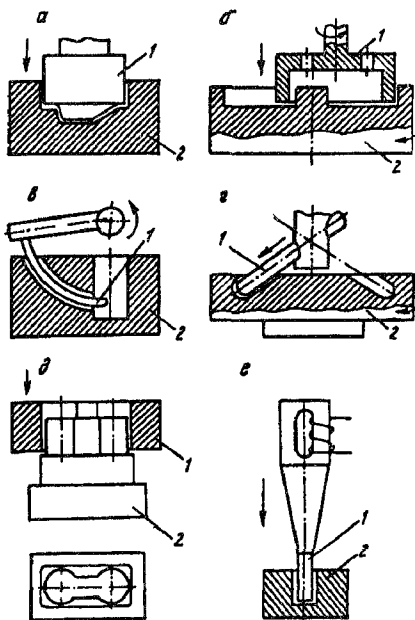


Рис. 2.58. Схемы прошивания:
 а—г — внутренних сложнопрофильных
 поверхностей; д — наружной комбини-
 рованной поверхности; е — отверстия;
 1 — инструмент; 2 — заготовка

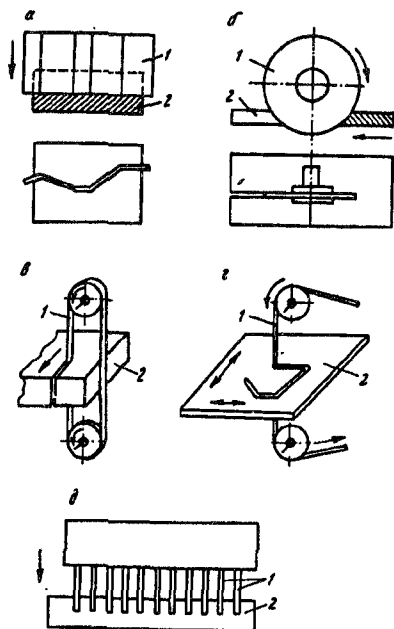


Рис. 2.59. Схемы разрезания (выреза-
 ния):
 а, д — с вертикальной подачей; б, в —
 с горизонтальной подачей; г — с по-
 дачами в двух направлениях; 1 — ин-
 струмент; 2 — заготовка

В настоящее время применяют следующие технологические схемы электрической обработки: 1) прошивка — формирование полостей и отверстий (рис. 2.58); 2) разрезание и вырезание — разделение заготовок на части, формирование замкнутого фасонного контура (рис. 2.59); 3) шлифование — сглаживание неровностей шероховатой поверхности, повышение точности, удаление дефектного слоя (рис. 2.60); 4) клеймение (маркирование, гравирование) — нанесение надписей, штрихов шкал.

Электроэрозионная обработка осуществляется в среде диэлектрика. Это могут быть: масла (вазелиновое, трансформаторное или индустриальное И-12А), керосин, технически чистая или дистиллированная вода, а также смеси, например глицерина с водой, керосина с маслом и т. д.

Электроконтактную обработку можно выполнять в газовой (воздушной) среде. В зависимости от свойств рабочей среды изменяется доля полезного использования энергии импульса, его предельная

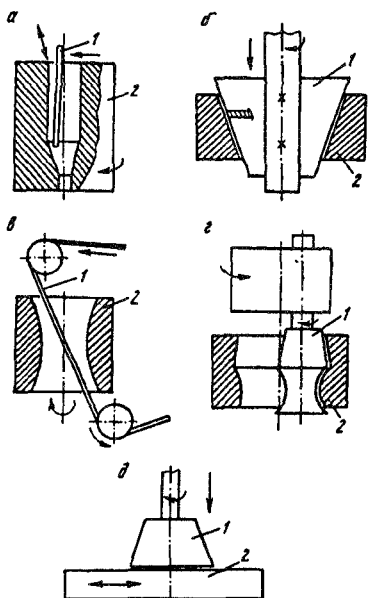


Рис. 2.60. Схемы шлифования поверхностей:

a — внутренней цилиндрической; *б* — внутренней конической; *в, г* — внутренних фасонных; *д* — плоской; 1 — инструмент; 2 — заготовка

сов. А в электроимпульсном режиме применяется обратная полярность. Правильно выбранная полярность существенно снижает износ инструмента, который может составлять от 5 до 300% массы удаленного с заготовки материала.

Для чистовой обработки, осуществляемой обычно в электроискровом режиме, чаще всего используют инструменты из обычной и пористой меди, латуни. Для черновых операций, выполняемых в электроимпульсном режиме, для изготовления электродов-инструментов применяют: графитовые и медно-графитовые композиции, алюминий, цинковые сплавы. Для изготовления мелких отверстий часто используют инструменты из вольфрама или молибдена, которые обладают высокой абразивной стойкостью, но дороги. Для электроконтактной обработки применяют инструменты из меди, латуни, чугуна или стали. Серый чугун имеет удовлетворительную эрозионную стойкость при обработке на всех режимах.

В электроискровом режиме напряжение пробоя $U = 40...180$ В, длительность импульса $\tau_{им} = 5...200$ мкс, сила тока $I = 0,5...5$ А. При электроимпульсном режиме $U = 18...36$ В, $\tau_{им} = 200...100\ 000$ мкс,

мощность. Для каждого вида обработки применяют оптимальные диэлектрические среды. Так, при электроэрозионной обработке с малой энергией импульса высокую производительность обеспечивает дистиллированная и технически чистая вода, при грубых режимах (электроимпульсная обработка) применяют масла.

В процессе обработки рабочая среда загрязняется, что снижает производительность. Допустимая загрязненность для черновых режимов — 4...5% по массе, а для чистовых — 2...3%.

Полярность подключения источника тока зависит от длительности импульсов и материала электрода-инструмента. Прямая полярность (к электроду-инструменту подводится минус) применяется в электроискровом режиме с относительно малой длительностью импуль-

$I = 20 \dots 120$ А. Максимальная производительность достигается при $I/\tau_{\text{им}} = 5 \dots 8$ мА/с.

При электроконтактном режиме импульсы тока формируются непосредственно в промежутке между инструментом и заготовкой вследствие их относительного движения и наличия микровыступов на рабочей поверхности инструмента. Напряжение применяемого источника постоянного или переменного тока $U = 1 \dots 20$ В.

Параметр шероховатости Ra поверхности, обработанной в электроискровом режиме, для сталей равен $0,3 \dots 0,6$ мкм, а для твердых сплавов — $0,2 \dots 0,3$ мкм. После обработки в электроимпульсном режиме $Ra = 5 \dots 10$ мкм. При электроэрозионном шлифовании в жидкости $Ra = 0,5 \dots 0,8$ мкм, а на воздухе (обдирочное) $Ra = 36 \dots 100$ мкм. При разрезании $Ra = 20 \dots 50$ мкм.

Глубина измененного (дефектного) подповерхностного слоя зависит от вида и режима электроэрозионной обработки. При предварительной (электроимпульсной) обработке она равна $0,1 \dots 0,4$ мм, при чистовой (в электроискровом режиме) — $0,004 \dots 0,1$, при шлифовании в жидкости — $0,005 \dots 0,08$, при разрезании в жидкости — $0,05 \dots 0,1$, при электроконтактной обработке на воздухе — $1 \dots 5$ мм.

При электроэрозионной обработке точность изготовления деталей зависит от точности изготовления электрода-инструмента, износа инструмента вследствие эрозии, неравномерности распределения припуска. Обычно электрод-инструмент изготавливают на один-два качества точнее, чем предусмотрено требованиями к точности обрабатываемой поверхности. Для компенсации износа при прошивании сквозных цилиндрических поверхностей увеличивают длину рабочего хода до тех пор, пока не прекратятся боковые разряды. При обработке глухих поверхностей на каждой стадии обработки приходится заменять изношенный электрод-инструмент новым. Для компенсации износа проволоки при разрезании и шлифовании ее перематывают (см. рис. 2.59, *г* и 2.60, *в*) со скоростью $0,8 \dots 5$ мм/с.

Точность изготовления деталей в электроискровом режиме профильным электродом-инструментом достигает 6-го, 7-го квалитетов, непрофилированным — 5-го, 6-го квалитетов; в случае применения электроимпульсного режима точность изготовления соответствует 9...11-му квалитетам; при электроконтактной обработке в жидкой среде (рис. 2.60, *г*, *д*) получают 7-й, 8-й квалитеты, а при обработке на воздухе (рис. 2.60, *б*, *в*) — 16-й, 17-й квалитеты точности.

При прошивании и разрезании размеры инструмента зависят от размера заготовки с учетом зазора. Боковой зазор зависит от энергии импульсов, материала электродов, состава и направления движения рабочей среды. В черновых режимах боковой зазор $0,005 \dots 0,5$ мм,

а в чистовых — 0,005...0,05 мм. При прошивании полостей торцовый зазор получается меньше бокового.

Если площадь поверхности электрода-инструмента достаточно велика (больше 1000 мм²) или прошиваются глубокие отверстия, то применяют искусственную прокачку рабочей среды через межэлектродный промежуток. Жидкость прокачивается через отверстия в электроде-инструменте. Диапазон скоростей прокачки через межэлектродный промежуток составляет 0,03...0,8 м/с для графитовых инструментов и 0,03...0,2 м/с для медных. При меньших скоростях продукты обработки накапливаются в промежутке, нарушая процесс электроэрозионной обработки. Если скорость превышает верхний предел, то возрастает давление жидкости на электроде-инструменте, снижается точность обработки, увеличивается расход энергии на прокачку.

Электрохимическая размерная обработка (ЭХРО) осуществляется в среде электролита за счет анодного растворения. Электролит выполняет одновременно несколько функций: обеспечивает за счет своего состава и электропроводности протекание электрохимического процесса, вынос продуктов электродных реакций, отвод теплоты, выделившейся при прохождении электрического тока, и т. д. Состав электролита зависит от материала заготовки и вида обработки. Некоторые составы электролитов приведены в табл. 2.32.

Табл. 2.32. Составы электролитов для ЭХРО

Компоненты электролита	Номер электролита						
	1	2	3	4	5	6	7
	Содержание компонента, % (по массе)						
KNO ₂ , KNO ₃	—	—	—	—	—	12...15	5...7
C ₆ H ₅ O ₇	—	—	—	1	—	—	—
NaNO ₃	—	—	—	5..10	15...20	—	0,5...1,5
NaCO ₃	—	5,6	10..15	—	—	—	—
NaCl	10...20	7,5	8...10	—	—	—	—

Электролит 1 применяется для всех видов обработки заготовок из углеродистой стали и для прошивания отверстий в заготовках из легированной стали. Для прошивания полостей в штампах и пресс-формах применяют электролиты 5 и 6. Их можно использовать для прошивания отверстий и шлифования заготовок из жаропрочных сталей. Для прошивания, разрезания и шлифования заготовок из твердых сплавов используются электролиты 2 и 3, а из алюминиевых

сплавов — 4. Электролит 7 используют для шлифования заготовок из магнитных литых сплавов. В растворы электролитов в качестве добавок можно вводить: буферные вещества для снижения защелачивания электролита (борная, лимонная, соляная кислоты); ингибиторы коррозии (например, нитрит натрия); активирующие вещества, которые снижают пассивирующее действие оксидной пленки (ионы брома, йода); ускорители осаждения продуктов обработки — коагуляторы, которые способствуют быстрой очистке электролита (1...5 г/л полиакриламида).

Для нормального протекания электрохимических реакций необходимо обеспечить интенсивный вынос продуктов обработки из межэлектродного промежутка, поэтому электролит должен протекать со скоростью, достаточной для захвата и удаления твердых и газообразных частиц, образующихся в ходе реакции. Скорость протекания электролита может задаваться в широких пределах ($v_3 = 5...20$ м/с) в зависимости от вида выполняемой операции. Так, например, при прошивании мелких полостей и отверстий $v_3 = 6...10$ м/с, а крупных $v_3 = 10...16$ м/с. При электрохимическом шлифовании $v_3 = 12...20$ м/с, а при разрезке дисковым электродом $v_3 = 10...12$ м/с.

Рабочий зазор между электродом-инструментом и обрабатываемой поверхностью выбирается в пределах 0,02...1 мм в зависимости от вида выполняемой операции и размеров обработки. Так, например, при прошивании мелких отверстий зазор равен 0,02...0,3 мм, а при прошивании крупных полостей с длиной контура более 40 мм — 0,3...0,1 мм. При электрохимическом шлифовании зазор равен 0,1...0,8 мм, а при разрезании — 0,1...0,5 мм.

Электрохимическая обработка проводится обычно при напряжении от 6 до 30 В. Для большинства схем используют диапазон напряжений 9...18 В (для титановых сплавов 25...30 В). Разрезание материалов осуществляется при напряжении 25...30 В. При шлифовании напряжение снижают до 6...8 В. В некоторых случаях напряжение подается в межэлектродный промежуток отдельными импульсами. В паузах между импульсами анодного растворения металла не происходит, а электролит протекает. За счет этого межэлектродный промежуток освобождается от продуктов обработки, выравнивается температура электролита. Это повышает экономические показатели процесса. Однако при такой подаче напряжения снижается скорость съема металла и усложняются источники питания.

В настоящее время электрохимическая обработка позволяет получать точность: 1) по 12...14-му квалитетам при обработке полостей и разрезании заготовок; 2) по 9-му и 10-му квалитетам при про-

шивании мелких отверстий (диаметром до 2 мм); 3) по 6-му и 7-му квалитетам при шлифовании.

Наибольшее влияние на погрешность обработки оказывают нестабильность электропроводности электролита и зазора, отклонение от расчетного режима течения электролита, погрешность настройки и установки. Повысить точность обработки можно за счет: уменьшения межэлектродного зазора (особенно с применением импульсного напряжения); наложения на электрод-инструмент вибраций частотой от нескольких герц до десятков килогерц (направление вибраций параллельно и перпендикулярно к направлению подачи); локализации процесса анодного растворения, т. е. ограничения проводимости тока через участки заготовки, прилегающие к обрабатываемому. Для локализации применяется обработка заготовки отдельными секциями электрода-инструмента, на которые последовательно подают напряжение. Последовательность включения секций направлена против движения электролита, поэтому все продукты обработки удаляются из зазора, минуя работающую секцию. Наиболее широко применяют локализацию обрабатываемого участка путем диэлектрических покрытий заготовки или инструмента.

Если электрохимическая обработка выполняется после механической, то в начале процесса анодного растворения микрорельеф повторяет исходный профиль заготовки. После точения, например, необходимо удалить припуск, в 10...12 раз больший, чем начальная высота микронеровностей, пока не перестанет проявляться влияние обработки, предшествующей электрохимической. Характер получившихся микронеровностей зависит от структуры обрабатываемого материала по причине межкристаллитного растворения. При высоких плотностях тока ускоренное растворение может наблюдаться не по границам, а по самому зерну. Применение импульсного тока способствует снижению высоты микронеровностей на 20...30%.

При обработке конструкционных сталей в электролитах на базе хлорида натрия получаем $Ra = 0,32...0,1$ мкм, нержавеющей сталей — $Ra = 1,25...0,32$ мкм, титановых сплавов — $Ra = 2,5...1,25$ мкм, алюминиевых сплавов — $Ra = 2,5...6,3$ мкм.

Электрохимическая обработка может применяться в тех случаях, когда другие методы малоэффективны. Например, для удаления заусенцев в труднодоступных местах (рис. 2.61). После сверления сообщающихся каналов в топливной или гидроаппаратуре на кромках отверстий образуются заусенцы 4.

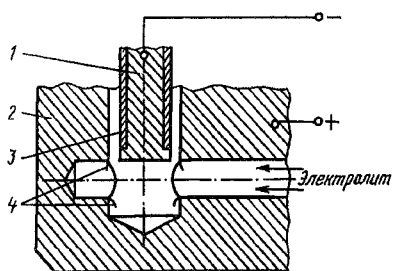


Рис. 2.61. Схема удаления заусенцев в отверстиях электрохимической обработкой

Их необходимо удалить, а кромки скруглить. Для этого в одно из отверстий заготовки 2 вводится электрод-инструмент 1, наружная поверхность которого покрыта изоляцией 3. Процесс растворения заусенцев и скругления кромок занимает доли минуты.

Анодно-механическая обработка объединяет разные способы, основанные на совместном использовании электрохимического и механического воздействия для удаления припуска. В эту группу входят собственно анодно-механическая обработка металлическим электродом, обработка электронейтральным абразивным инструментом при одновременном электрохимическом воздействии, обработка токопроводящими абразивными инструментами (на металлической связке) и некоторые другие способы. Особенностью большинства способов этой группы является сочетание высокой удельной производительности (съема металла) и малой шероховатости обработанной поверхности. Некоторые схемы анодно-механической обработки показаны на рис. 2.59, б—г и 2.60, в—д.

Основные достоинства предварительной анодно-механической обработки: высокая производительность на жестких режимах, небольшие механические силы обработки, возможность обрабатывать сплавы высокой твердости. Недостатки: наличие заметной зоны термического влияния, недостаточная технологичность применяемого электролита, заметный износ электрода-инструмента, обязательность главного движения с большой скоростью.

Анодно-механическое шлифование проводится при напряжении от 4 до 20 В, давлении инструмента 50...150 кПа, скорости движения инструмента 1...30 м/с и обеспечивает $Ra = 0,8...0,05$ мкм. Шероховатость увеличивается при увеличении номера зернистости абразива (M7...M40).

Одна из схем ультразвуковой обработки показана на рис. 2.58, г. Сообщая инструменту и заготовке различные виды подач и меняя профиль сечения инструмента, можно прошивать глухие и сквозные отверстия, обрабатывать плоскости, углубления и пазы, разрезать заготовки, обрабатывать криволинейные и кольцевые пазы по копиру, обрабатывать наружные поверхности вращения, выполнять шлифование и полирование.

Обработка может осуществляться перемещающимся непрофилированным инструментом — тонкой проволокой (рис. 2.62). Ультразвуковой концентратор 2, соединенный с преобразова-

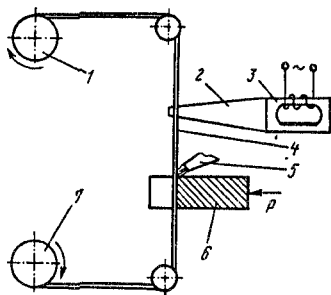


Рис. 2.62. Схема ультразвукового разрезания

телем 3, возбуждает колебания в проволоке-инструменте 4, перематываемой с катушки 1 на катушку 7. Заготовка 6 прижимается с небольшой силой P к проволоке 4, а в зону их контакта подается абразивная суспензия из трубопровода 5.

Ультразвуковой обработке хорошо поддаются хрупкие материалы: стекло, керамика, ферриты, твердые сплавы, закаленные и азотируемые стали. Тип абразива, его концентрация сильно влияют на производительность, точность и качество ультразвуковой размерной обработки. Зерна абразива выполняют функции режущего инструмента, поэтому они по твердости должны хотя бы не уступать обрабатываемому материалу. Обычно применяют карбид бора, который хорошо смачивается водой и благодаря сравнительно небольшой плотности удовлетворительно переносится жидкостью. Другие абразивные материалы (карбид кремния, электрокорунд) обеспечивают меньшую (на 17...27%) производительность по сравнению с карбидом бора.

В качестве жидкости, несущей абразив, обычно используют воду, в которую добавляют ингибитор коррозии и другие добавки (например, 15%-й раствор сернистой меди), повышающие производительность ультразвуковой обработки.

Параметры ультразвуковой обработки существенно зависят от размера зерен абразива и их концентрации. Уменьшение размера абразивных зерен вызывает снижение производительности, особенно если размер зерна меньше амплитуды колебаний. С другой стороны, чем меньше зерно, тем выше точность обработки. При оптимальной концентрации абразива в суспензии на обрабатываемую поверхность укладывается один слой зерен абразива. При повышенной концентрации абразива в суспензии будет увеличиваться доля работы, идущей на диспергирование самих зерен.

Чем больше амплитуда и частота колебаний, тем выше производительность обработки. Оптимальная амплитуда колебаний составляет 0,6...0,8 размера абразивных зерен. Если амплитуда колебаний будет в 2 раза больше размера зерен, то производительность может снизиться в 1,25...3 раза.

При ультразвуковой обработке обычными абразивными порошками погрешность размера достигает 15...30 мкм. Шероховатость обрабатываемой поверхности пропорциональна размеру абразивных зерен. Использование мелких шлифпорошков (№ 3) и микропорошков дает $Ra = 1,2...0,4$ мкм, а при доводке $Ra = 0,2$ мкм.

Для создания ультразвуковых колебаний применяют магнито-стрикционные и пьезоэлектрические преобразователи. Первые представляют собой сердечник из сплавов никеля, железокобальтовых или железоалюминиевых сплавов с обмоткой. Переменный ток в обмотке вызывает переменное магнитное поле, которое, перемаг-

ничивая сердечник, изменяет его размер. В пьезоэлектрических преобразователях деформация возникает под действием электрического поля. Они изготавливаются из пьезокерамики на основе твердых растворов титан-цирконата свинца и чаще всего имеют форму стержней и пластин.

Для увеличения амплитуды колебаний преобразователя служит концентратор 2 (на рис. 2.62), который чаще всего представляет собой стержень переменного сечения. Сечение концентратора может уменьшаться линейно (конус), по экспоненте или ступенчато. Рабочие инструменты при ультразвуковой обработке быстро изнашиваются, поэтому их целесообразно делать сменными. Они крепятся к концентратору с помощью резьбового соединения с мелким шагом.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Назовите способы воздействия на заготовку.
2. Назовите процессы, протекающие при формообразовании.
3. Изобразите схемы различных соединений режущей кромки с державкой.
4. Как классифицируются процессы обработки по динамике?
5. Изобразите схему строгания Т-образного паза.
6. Изобразите схему долбления шпоночного паза в отверстии.
7. Изобразите схему растачивания угловой канавки для выхода инструмента.
8. Изобразите схему съема припуска при нарезании резьбы резцом.
9. Изобразите схему зенкерования инструментом с передним направлением.
10. Изобразите схему «вихревого» нарезания резьбы.
11. Изобразите схему фрезерования резьбы групповой фрезой.
12. Изобразите схему протягивания шпоночного паза.
13. Изобразите схему круглого врезного бесцентрового шлифования.
14. Изобразите схему круглого бесцентрового шлифования на проход.
15. Изобразите схему круглого бесцентрового шлифования на жестких опорах.
16. Изобразите схему правки шлифовального круга методом обтачивания.
17. Изобразите схему правки шлифовального круга методом обкатывания.
18. Изобразите схему правки шлифовального круга методом шлифования.
19. Изобразите схему правки шлифовального круга методом накатывания.
20. Изобразите график изменения подачи и производительности при круглом врезном шлифовании со ступенчатым алгоритмом управления.
21. Изобразите график изменения подачи и производительности при многопроходном шлифовании с подачей на двойной ход.
22. Изобразите схему ориентации (базирования) заготовки в зоне круглого бесцентрового шлифования.
23. Изобразите схемы ленточного шлифования.
24. Изобразите схему хонингования и получаемую при этом сетку рисок.
25. Изобразите схему суперфиниширования.
26. Изобразите схемы доводки наружных цилиндрических поверхностей.
27. Изобразите схемы доводки внутренних цилиндрических поверхностей.
28. Изобразите схемы доводки сферических поверхностей.

29. Изобразите схемы обычной и шпindelной виброабразивной обработки.
30. Изобразите схему магнитоабразивного полирования 1-й группы.
31. Изобразите схему магнитоабразивного полирования 2-й группы.
32. Изобразите схемы обработки ППД со скольжением рабочего элемента.
33. Изобразите схемы обработки ППД с качением рабочего элемента.
34. Изобразите схему накатывания резьбы двумя роликами (врезанием).
35. Изобразите схему накатывания резьбы плоскими плашками.
36. Изобразите схему кругового протягивания зубьев конического колеса.
37. Изобразите схемы обработки зубьев червячных колес модульной червячной фрезой.
38. Изобразите схему строгания зубьев конического колеса.
39. Изобразите схемы обработки зубьев цилиндрического колеса модульным долбяком
40. Изобразите схемы шевингования цилиндрических зубчатых колес.
41. Изобразите схемы шлифования зубьев цилиндрических колес.
42. Изобразите схемы электроэрозионной обработки.
43. Изобразите схемы электрохимической обработки.
44. Изобразите схемы ультразвуковой размерной обработки.

3

СТРУКТУРНЫЕ КОМПОНЕНТЫ
ТЕХНОЛОГИИ СБОРКИ МАШИН

3.1. Классификация работ при сборке

Все работы, выполняемые в процессе сборки машин, можно разбить на два класса: *вспомогательные* и *сборочные*. При выполнении последних осуществляются соединения, классификация которых приведена на рис. 1.12. Для получения любого соединения следует осуществить относительную ориентацию собираемых деталей и затем сообщить им необходимое относительное перемещение. В некоторых случаях необходима предварительная подготовка сопрягаемых деталей, которая заключается либо в их соединении с элементами сборочных приспособлений (см. рис. 2.1), либо в предварительном размещении на транспортном средстве, либо в подготовке поверхностей для нанесения клея и т. д. Классификация вспомогательных работ показана на рис. 3.1. Цель данных работ — подобрать детали для сборки, проконтролировать ее результаты, подготовить собранную сборочную единицу (машину) к складированию и отправке потребителю.

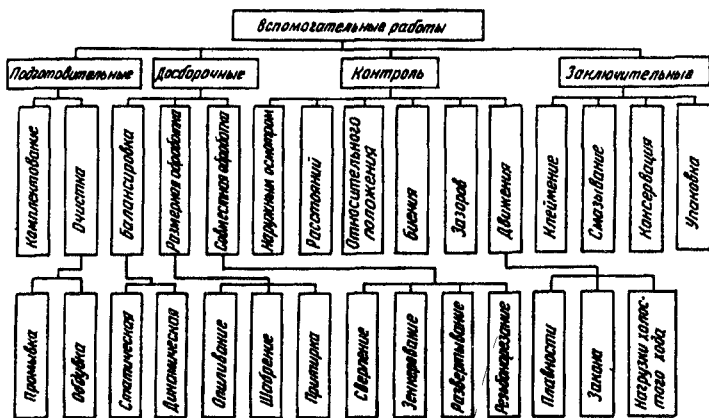


Рис. 3.1 Классификация вспомогательных работ при сборке

3.2. Способы сборки неподвижных разъемных соединений

3.2.1. Сборка резьбовых соединений

Резьбовые соединения в конструкциях машин составляют 15...20% общего количества соединений. По назначению выделяют следующие виды резьбовых соединений: для обеспечения прочности, для обеспечения прочности и герметичности, для регулирования относительного положения деталей. А по конструкции различают резьбовые соединения болтом, шпилькой с гайкой, винтом.

Процесс сборки резьбового соединения в общем случае складывается из следующих элементов: подачи деталей, установки их и предварительного ввертывания (наживления), подвода и ориентации инструмента, завинчивания, затяжки, отвода инструмента, выполнения процесса, необходимого для предохранения от самоотвинчивания. В единичном и серийном производстве все это выполняется оператором вручную. В крупносерийном и массовом производстве применяют механизацию и автоматизацию сборки резьбовых соединений. При механизации для завинчивания и затяжки используются устройства с искусственным источником энергии (электрической и пневматической).

Неподвижность шпильки, ввинченной в корпус, достигается натягом, создаваемым одним из трех способов: коническим сбегом резьбы, упорным буртом или тугой резьбой с натягом по среднему диаметру. Использование первого способа рационально лишь в соединениях, не несущих особенно больших нагрузок и не подверженных вибрациям. В последнее время получает распространение постановка шпилек с клеем. Для этого обезжиривают свинчиваемые поверхности, наносят слой клея, шпильку ввинчивают в корпус на заданную длину и затем на выступающий конец шпильки надевают монтажную втулку и затягивают гайку. В таком виде соединение выдерживают до отверждения клея.

Крутящий момент $M_{\text{крут}}$, необходимый для завинчивания шпильки в корпус, при натяге по среднему диаметру определяется для метрической резьбы следующим неравенством:

$$M_{\text{крут}} \geq 1,6 d L E \Delta f,$$

где d — наружный диаметр резьбы; L — длина свинчивания; E — модуль упругости материала корпуса; Δ — натяг по среднему диаметру резьбы; f — коэффициент трения скольжения. Значения f и E зависят от материала корпуса (табл. 3.1). Уменьшить коэффициент трения скольжения на 35...40% можно смазыванием резьбовой пары.

Табл. 3.1. Значения коэффициента трения и модуля упругости

Материал корпуса	f	E , МПа
Сталь	0,1...0,2	195 000...210 000
Чугун	0,07...0,15	78 000...145 000
Цветные сплавы	0,04...0,1	80 000...110 000

При постановке шпилек должны выполняться следующие требования: 1) шпилька должна иметь достаточно прочную посадку в корпусе, чтобы при свинчивании даже туго посаженной гайки она не вывинчивалась; 2) отклонения от перпендикулярности не должны превышать значений, указанных в табл. 3.2.

Табл. 3.2. Предельные отклонения от перпендикулярности, мкм

Степень точности	Длина выступающей части, мм		
	до 50	50...125	125...250
4	50	50	75
6	50	75	100
8	75	100	175

Для ввертывания шпилек применяют приспособление, патрон которого захватывает шпильку за резьбовую часть (рис. 3.2, а) или за гладкий стержень (рис. 3.2, б). Захват за резьбовую часть осуществляется резьбовыми губками 1 патрона, которые могут свободно поворачиваться на осях 2. Раскрытие губок осуществляется пружинами 3 и 5. Пружина 3 сдвигает вниз каретку 4, что дает возможность пружине 5 раскрыть губки. При подводе патрона шпилька упирается в шайбу 6, которая, нажимая на кромки губок 1, осуществляет их смыкание. Затем, при дальнейшем движении патрона вдоль его оси, сжимается пружина 3 и коническая часть корпуса 7 окончательно сжимает губки 1 на резьбовой части шпильки, что дает возможность заворачивать ее. Недостатком такого

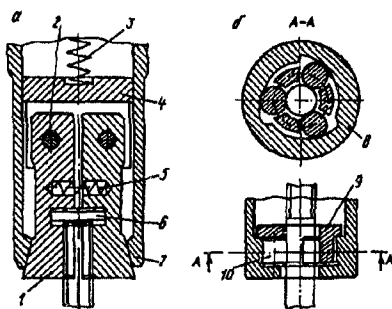


Рис. 3.2. Патроны приспособлений для закрепления и заворачивания шпилек

ее. Недостатком такого способа установки шпилек является возможное вытягивание резьбы наружной части шпильки, а также скручивание шпильки (при значительной заданной длине выступающей части и больших натягах в резьбе). В этом отношении более рациональным следует считать способ захвата шпильки за ее ненарезанную часть патроном другой конструкции (рис. 3.2, б).

Корпус 8 патрона (ключа) имеет внутренние спиральные канавки, в которые помещены ролики 10, удерживаемые обоймой 9. При повороте патрона ролики захватывают ненарезанный поясok шпильки и обеспечивают ее закручивание.

В конструкциях машин применяются различные типы резьбовых соединений, собираемых преимущественно с предварительной затяжкой, степень которой зависит от характера и уровня сил, нагружающих соединение. Предварительная затяжка играет существенную роль в повышении долговечности работы резьбовых соединений в сборочных единицах, особенно при переменных нагрузках. Так, например, если рабочая нагрузка изменяется от 0 до 40 кН, а предварительная затяжка болта — от 25 до 35 кН, то долговечность болта изменяется от 36 тыс. до 5 млн циклов.

В случае многоболтового (многовинтового) соединения необходимо также обеспечить равномерность затяжки всех его элементов. Требования к равномерности затяжки еще больше повышаются, если в соединении необходима герметичность.

Предельные значения крутящего момента, которым должны быть затянуты гайки или винты, устанавливаются обычно в зависимости от номинального диаметра резьбы (рис. 3.3). При сборке ответственных соединений они указываются в технических требованиях к сборочной единице.

При сборке ответственных резьбовых соединений используются следующие способы ограничения момента затяжки: 1) применение специальных (предельных или динамометрических) ключей (отверток); 2) поворот гайки на определенный, заранее установленный угол; 3) комбинированный способ.

Основным элементом предельного ключа является предельная кулачковая муфта, максимальный передаваемый момент которой регулируется сжатием или ослаблением пружины. Такие ключи применяются в крупносерийном и массовом производстве, так как

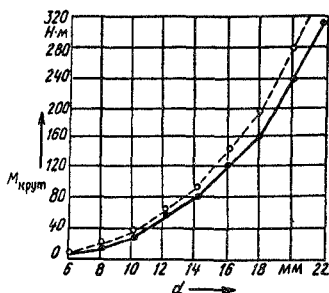


Рис. 3.3. Зависимость требуемого момента $M_{крот}$ затяжки от номинального диаметра d резьбы

они настраиваются обычно на определенный крутящий момент и регулировка их на рабочем месте, как правило, запрещена. Основные элементы динамометрического ключа — упругий элемент и измерительный преобразователь, преобразующий упругую деформацию в показания на шкале или отключающий от привода сигнал. Целью предварительной затяжки является создание в стержне болта (шпильки, винта) и в подповерхностных слоях контактирующих деталей сборочной единицы определенного уровня напряжений. Погрешность решения этой задачи способами первой группы из-за колебаний коэффициента трения в резьбе и на торце гайки составляет 10...16%.

Значительные погрешности (14...22%) дает также затяжка с измерением угла поворота гайки. Объясняется это затруднениями в определении начала отсчета. Особо большие неточности получаются при затяжке этим способом соединений с короткими болтами или шпильками. Наименьшей погрешности (4...5%) можно достичь при затяжке комбинированным способом, когда затяжку выполняют в два этапа: вначале с помощью предельного (или динамометрического) ключа, а затем путем довертывания гайки на заданный угол поворота, который определяют (предварительно) из диаграммы, построенной на основании экспериментов.

При пульсирующей или знакопеременной нагрузке предварительная затяжка уменьшается, что может служить причиной аварии. Одна из основных конструктивных мер борьбы с самоотвинчиванием — стопорение. Применяются следующие способы стопорения: 1) создание дополнительных сил трения путем осевого или радиального давления (контргайкой, винтом, специальными конструктивными элементами на гайке); 2) фиксация гайки относительно винта, одной из скрепляемых деталей или другой гайкой (шплинтом, деформируемыми шайбами, проволокой); 3) местные пластические деформации (накернивание). Последний способ применяется, если соединения не требуют разборки.

3.2.2. Сборка разъемных соединений с натягом

К неподвижным разборным соединениям с натягом относятся соединения со шпонкой, тугоразъемные и легкоразъемные шлицевые соединения и неподвижные конические.

Шпонка в паз вала устанавливается обычно плотно или даже с натягом, а в пазу ступицы создается более свободная посадка. Детали соединения должны быть изготовлены в пределах допусков, оговоренных техническими требованиями. Допуск на смещение шпоночных пазов на валу и в охватывающей детали при одной шпонке не должен превышать двойного допуска на ширину паза, а при двух шпонках — половины его.

Сборка соединения со шпонкой состоит из следующих этапов: 1) установки и закрепления вала в приспособлении; 2) ориентирования и запрессовки шпонки в паз вала; 3) проверки посадки шпонки на валу на плотность и симметричность; 4) установки охватывающей детали. При установке крупных шпонок в паз вала не следует пользоваться молотком, так как вследствие внецентровых ударов возможен поперечный перекося шпонки и врезание ее кромки в тело вала и наоборот. В таких случаях шпонки запрессовывают под прессом или с помощью струбцин.

В конструкциях машин наибольшее распространение получили соединения с прямобочными шлицами. Реже встречаются эвольвентные или треугольные шлицы. Сборку шлицевых соединений начинают с осмотра состояния шлицев сопрягаемых деталей. Особое внимание уделяют осмотру внешних фасок и скруглений внутренних углов шлицев, так как при неправильном выполнении этих элементов возможно заедание при сборке. В тугоразъемных соединениях охватывающую деталь обычно напрессовывают на вал с помощью специального ориентирующего приспособления на прессе. Собирать такие соединения, применяя молоток, не рекомендуется, так как неравномерные и внецентровые удары могут вызвать перекося охватывающей детали на шлицах и даже задир шлицев. При очень тугих шлицевых соединениях целесообразно перед запрессовкой нагреть охватывающую деталь до 80...120 °С. После установки и закрепления охватывающей детали на шлицах соединение следует проверить на биение.

Конические соединения с неподвижной посадкой часто применяют взамен цилиндрических, так как при сборке они имеют ряд преимуществ. В начале сборки вал легко входит в отверстие и самоцентрируется, что особенно важно при сборке крупных деталей. Напряженность посадки (необходимый натяг) в коническом соединении создается осевой напрессовкой охватывающего конуса на охватываемый и поэтому может регулироваться. Основным требованием, которое предъявляется к собираемым деталям конического соединения, является допуск углов конусов охватывающей и охватываемой деталей. Он должен быть существенно меньше отношения натяга к длине конуса охватывающей детали. Полученный натяг можно контролировать по осевой осадке.

Осевая сила, необходимая для сборки конического неподвижного соединения, в средне- и малогабаритных сборочных единицах создается предусмотренной в конструкциях гайкой, которую необходимо затягивать предельным или динамометрическим ключом.

3.3. Сборка неподвижных неразъемных соединений

3.3.1. Сборка неразъемных соединений с натягом

Некоторые виды соединений с натягом показаны на рис. 3.4. Одним из основных способов получения неразъемных соединений с натягом является продольное прессование, которое состоит из следующих главных этапов: 1) относительной ориентации; 2) приложения осевой силы, надвигающей одну деталь на другую. При этом нормальная сила прессования $P_{\text{нор}}$ возрастает от нуля до некоторого максимального значения, которое зависит от натяга δ и длины запрессовки l :

$$P_{\text{нор}} = \frac{0,00314 f \delta l}{C_1/E_1 + C_2/E_2},$$

где f — коэффициент трения скольжения при запрессовке;

$$C_1 = (1 + K_1^2)/(1 - K_1^2) - \mu_1;$$

$$C_2 = (1 + K_2^2)/(1 - K_2^2) - \mu_2;$$

$$K_1 = d_0/d; K_2 = d/D;$$

μ_1, μ_2 — коэффициенты Пуассона для материалов соответственно охватываемой и охватывающей деталей; d_0, d, D — размеры соединения (см. рис. 3.4); если охватываемая деталь — сплошной вал, то $d_0 = K_1 = 0$; при охватываемой детали в виде плиты $K_2 = 0$; E_1, E_2 — модули упругости материала охватываемой и охватывающей деталей.

Значение расчетного натяга зависит от шероховатости и разности диаметров Δd сопрягаемых поверхностей:

$$\delta = \Delta d - 1,2 (Rz_1 + Rz_2),$$

где Rz_1, Rz_2 — параметры шероховатости сопрягаемых поверхностей деталей.

Коэффициент трения зависит от шероховатости поверхностей сопрягаемых деталей, их материала, давления на поверхностях контакта, а также наличия и характера смазочного материала. Пример зависимости коэффициента трения от давления и шероховатости показан на рис. 3.5. В процессе запрессовки применяют машинное, сурепное и авиационное масла. Смазывание предохра-

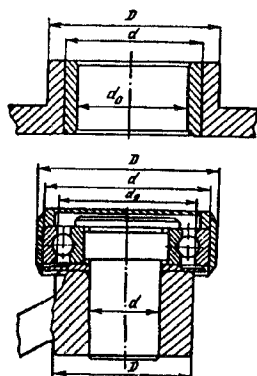


Рис. 3.4. Соединения с натягом по диаметру d

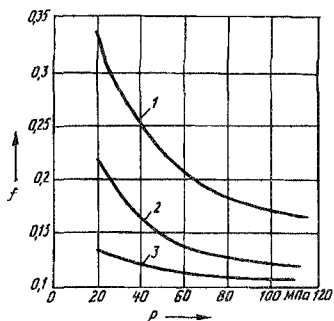


Рис. 3.5. Зависимость коэффициента трения f при прессовании от удельного давления p и параметра шероховатости: 1 — при $Rz = 0,16...0,32$ мкм; 2 — при $Rz = 1...1,25$ мкм; 3 — при $Rz = 2,5...3,2$ мкм

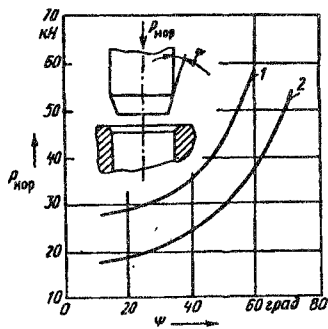


Рис. 3.6. Зависимость силы запрессовки от угла фаски на валу: 1 — при $\delta = 290$ мкм; 2 — при $\delta = 90$ мкм

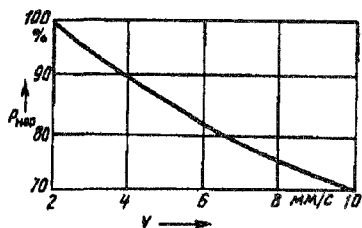


Рис. 3.7. Зависимость силы запрессовки от скорости запрессовки (относительное значение)

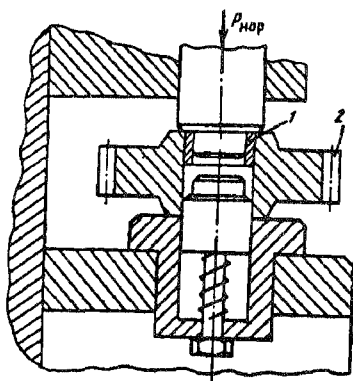
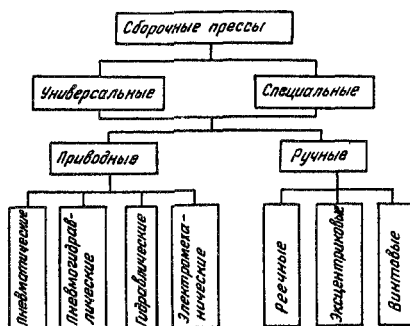


Рис. 3.8. Схема приспособления для ориентации и запрессовки втулок (1) в шерстню (2)

няет сопрягаемые поверхности от задиrow, снижает коэффициент трения при запрессовке.

Значительное влияние на силу запрессовки $P_{\text{нор}}$ оказывают также угол ψ конуса конца запрессовываемого вала (рис. 3.6), скорость запрессовки v (рис. 3.7) и погрешности формы сопрягаемых поверхностей в поперечном сечении. Последние снижают потребляемую силу запрессовки, так как уменьшается фактическая площадь контакта сопрягаемых поверхностей. Относительная ориентация деталей является очень важным элементом при продольном прессовании. Особенно опасны погрешности ориентирования при прессовании коротких деталей (длина l меньше диаметра сопряжения d). В этом случае, кроме задиrow, возможен и остаточный перекос (торцовое биеие) напрессованной детали. Поэтому для относительной ориентации применяется соответствующая оснастка (см. рис. 2.1 и 3.8).

Рис. 3.9. Классификация сборочных прессов



Силы, необходимые при продольном прессовании, создают с помощью прессов, классификация которых приведена на рис. 3.9. Типоразмер сборочного пресса выбирается в зависимости от габаритов сборочной единицы и требуемой силы прессования.

Основным недостатком продольного прессования является ослабление посадки, вызванное сглаживанием неровностей в процессе прессования. Для уменьшения этого ослабления можно применять гальванические покрытия на сопрягаемых поверхностях медью, никелем или хромом. Указанного недостатка нет у соединений с натягом, полученных сборкой с использованием нагрева охватывающей детали или охлаждения охватываемой. В одних и тех же условиях прочность тепловых посадок при передаче крутящего момента в 2...3 раза выше, чем посадок, полученных продольным прессованием. Время на сборку крупногабаритных соединений тепловым способом сокращается в 2...4 раза, отпадает необходимость в тяжелых сборочных прессах.

Температура $t_{\text{наг}}$, до которой следует нагревать охватывающую деталь, определяется по формуле

$$t_{\text{наг}} = 1,23 (\Delta d / (dK_{\alpha}) + t_{\text{нач}}),$$

где Δd — разность размеров охватываемой и охватывающей деталей; d — номинальный диаметр соединения; K_{α} — коэффициент линейного расширения материала нагреваемой детали; $t_{\text{нач}}$ — начальная температура детали.

Обычно температура $t_{\text{наг}}$ не превышает 360 °С. Большой нагрев деталей не рекомендуется. Если бронзовая втулка сопрягается с массивной стальной деталью, то вследствие значительной разницы в коэффициентах линейного расширения из-за нагрева втулки от охватывающей массивной остывающей детали возникают остаточные пластические деформации бронзовой втулки, ведущие к ослаблению посадки.

Температура $t_{\text{ох}}$ охлаждения охватываемой детали может быть найдена по формуле

$$t_{\text{ох}} = t_{\text{нач}} - (\Delta d + b_1)/(K_{\alpha} d),$$

где b_1 — минимальный зазор, позволяющий легко вводить охватываемую деталь в отверстие. Значение зазора b зависит от диаметра сопряжения d :

$$b = (0,0005 \dots 0,011) d,$$

где коэффициент (сомножитель d) пропорционален времени выполнения операции. Значения K_{α} приведены в табл. 3.3.

Табл. 3.3. Значения K_{α} , $10^6 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$

Материал	Нагрев	Охлаждение
Сталь	11	—8,5
Чугун	10	—8
Бронза	17	—15
Латунь	18	—16
Алюминиевые сплавы	22	—18
Магниеые сплавы	26	—21

В зависимости от конструкции и назначения охватывающей детали ее нагревают в газовых или электрических печах в воздушной либо жидкой среде. Если температура деталей должна быть выдержана в узком диапазоне, то целесообразно вести нагрев в жидкой среде (минеральное масло). Температура нагрева в таких печах не превышает $110 \text{ } ^\circ\text{C}$. В индукционных печах температура нагрева может достигать $200 \text{ } ^\circ\text{C}$. Крупные охватывающие детали нагревают переносными электроспиральями, установленными в отверстиях с зазорами в $20 \dots 40$ мм.

Прочность соединений, выполняемых с нагревом охватывающей детали, повышается, если поверхность сопряжения покрывается промежуточным слоем материала: при покрытии свинцом — в 1,4 раза, а цинком — в 2,7 раза. Толщина пленки $20 \dots 40$ мкм.

Способы сборки с охлаждением охватываемой детали имеют ряд преимуществ перед горячей посадкой. Нагрев деталей сложной формы может явиться причиной температурных напряжений, местных деформаций, снижения твердости и увеличения окисления поверх-

ностей деталей. Сборка с применением глубокого холода не имеет таких недостатков. Прочность соединений, собранных с охлаждением охватываемой детали, при прочих равных условиях в 2...2,5 раза выше прочности соединений, полученных продольной запрессовкой, и на 10...15 % выше, чем при нагреве охватывающей детали. Если детали имеют на сопрягаемых поверхностях гальванические покрытия, то при сборке с охлаждением последние обычно не портятся, а прочность соединения возрастает еще больше.

Однако при низких температурах в некоторых марках стали возможны фазовые превращения (распад аустенита), в результате которых размеры детали могут увеличиваться. Это сопровождается заметным ростом натяга, что может быть причиной снижения качества сборки.

Охлаждение до -75°C осуществляют с помощью твердой углекислоты (сухого льда). Посредством холодильных машин температура охлаждения может быть доведена до -100°C . При необходимости можно получить еще более низкую температуру, применяя для охлаждения деталей жидкий воздух (-185°C) или азот (-195°C). Процесс охлаждения длится от нескольких минут до нескольких часов в зависимости от массы детали и типа охладителя. Расход охладителя на охлаждение путем погружения приведен в табл. 3.4. Приступать к охлаждению можно после того, как охватываемая деталь полностью готова к сборке. Сопрягаемые поверхности обеих деталей должны быть тщательно протерты и обезжирены.

Табл 3 4 Масса металла (кг), охлаждаемого 1 кг хладоносителя

Хладоноситель	Температура охлаждения, $^{\circ}\text{C}$	Металл			
		Сталь	Чугун	Алюминий	Бронза
Жидкий азот	-195	2,4	2,1	1,16	2,45
Сухой лед со спиртом	-78	16,5	14,4	7,9	16,7

3.3.2. Сборка соединений путем пластического деформирования

Пластическое деформирование используют при сборке соединений, натяг которых создается пластическим радиальным расширением охватываемой или сжатием охватывающей детали. Основное назначение таких соединений — обеспечение неподвижности и (или) герметичности. Примеры соединений данного типа

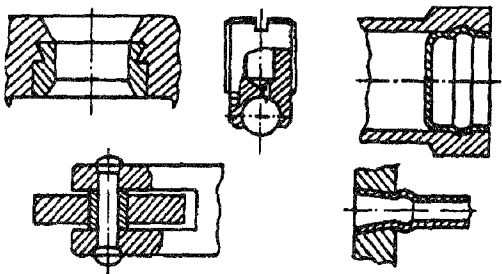


Рис. 3.10. Соединения, осуществляемые пластическим деформированием

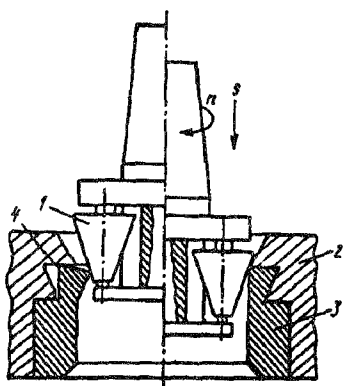


Рис. 3.11. Схема сборки клапанного седла вальцеванием

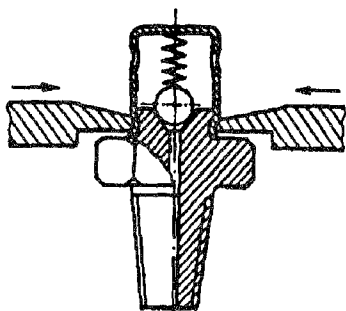


Рис. 3.12. Схема сборки обжатием

показаны на рис. 3.10. Они осуществляются вальцеванием, обжатием, осадкой и т. д.

Схема вальцевания приведена на рис. 3.11. С левой стороны изображено седло 3 в начале процесса, а с правой — в конце. Вальцовка представляет собой обойму конических роликов 1, вращающихся на осях, закрепленных в двух дисках. Вальцовке сообщается вращательное движение с частотой n и осевая подача s . Ролики вальцовки, обкатываясь по внутренней поверхности седла, равномерно раскатывают его и одновременно отгибают выступающую кромку 4 в коническую выточку корпуса 2. По поверхности сопряжения седла с корпусом создается большой натяг, неосуществимый при обычной запрессовке.

Вальцеванием можно выполнять пластическое деформирование концов стержней, стенок заглушек, трубок и т. д. Трубки малого диаметра для создания необходимой плотности в соединениях деформируют на конус осадкой (с помощью конического пуансона, которому сообщается осевое движение). Соединение деталей часто требует отбортовки концов трубок (край отгибается на угол 90°). Этот процесс выполняется в три этапа: 1) осадка с формированием конуса с углом $30...40^\circ$; 2) осадка с обеспечением конуса с углом 120° ; 3) отбортовка ступенчатым пуансоном. Степень деформации конца трубки, т. е. отношение диаметра отбортованного фланца к диаметру трубки, допускается в пределах $1,25...1,8$.

Вальцеванием можно выполнять пластическое деформирование концов стержней, стенок заглушек, трубок и т. д. Трубки малого диаметра для создания необходимой плотности в соединениях деформируют на конус осадкой (с помощью конического пуансона, которому сообщается осевое движение). Соединение деталей часто требует отбортовки концов трубок (край отгибается на угол 90°). Этот процесс выполняется в три этапа: 1) осадка с формированием конуса с углом $30...40^\circ$; 2) осадка с обеспечением конуса с углом 120° ; 3) отбортовка ступенчатым пуансоном. Степень деформации конца трубки, т. е. отношение диаметра отбортованного фланца к диаметру трубки, допускается в пределах $1,25...1,8$.

Схема сборки обжатием показана на рис. 3.12. Обжатие может быть местным или контурным. Процесс обжатия обычно осуществляется за один ход.

3.3.3. Сборка пайкой и склеиванием

Пайкой называется процесс получения неразъемного соединения двух или нескольких деталей с применением присадочного материала (*припоя*) путем их нагрева в собранном виде до температуры плавления припоя. Расплавленный припой затекает в специально создаваемые между соединениями деталей зазоры и диффундируют в металл этих деталей. При этом протекает процесс взаимного растворения металлов деталей и припоя с образованием сплава, более прочного, чем припой.

В зависимости от температуры плавления припоя различают пайку мягкими и твердыми припоями. *Мягкие* (оловянисто-свинцовые) *припои* имеют температуру плавления ниже $400\text{ }^{\circ}\text{C}$, а *твердые* (медные, медно-цинковые) *припои* — $400\text{...}1200\text{ }^{\circ}\text{C}$. Вид припоя назначается при разработке конструкции сборочной единицы с учетом условий ее работы и материала деталей и оговаривается в технических требованиях.

Кроме припоя, при пайке применяют *флюсы*, назначение которых сводится к защите места спая от окисления при нагреве, обеспечению лучшей смачиваемости места спая расплавленным припоем и растворению оксидов. В качестве флюсов для твердых припоев применяют буру и плавиковый шпат, а также их смеси с различными окислителями или солями щелочных металлов. При пайке мягкими припоями в качестве флюса используют канифоль, хлористый цинк, нашатырь или фосфорную кислоту. Пайку точных соединений осуществляют без флюса в защитной атмосфере или вакууме.

Процесс пайки состоит из следующих этапов: 1) подготовки сопрягаемых поверхностей деталей под пайку; 2) сборки; 3) нанесения флюса и припоя; 4) нагрева места спая; 5) промывки и зачистки шва.

Места под спай необходимо осмотреть и при наличии коррозии зачистить, затем промыть и обезжирить. Особое внимание следует обратить на зазор между сопрягаемыми поверхностями в соединении, предназначенный для пайки, так как от него зависят диффузионный обмен металла припоя с металлом деталей и прочность соединения. При пайке легкоплавкими припоями устанавливают зазор $0,025\text{...}0,075\text{ мм}$, при пайке серебряными припоями — $0,05\text{...}0,08\text{ мм}$, при пайке медью — $0,012\text{...}0,014\text{ мм}$. Припой должен быть зафиксирован относительно места спая. Его закладывают в виде фольговых прокладок, проволочных контуров, лент, паст вместе с флюсом, а также наносят в расплавленном виде. Собранные под пайку соеди-

нение должно быть надежно закреплено во избежание относительного смещения деталей во время нагрева.

В зависимости от вида нагрева различаются следующие способы пайки: газовая, погружением (в металлическую или соляную ванну), электрическая (индукционная, контактная), в печах, ультразвуковая. В индивидуальном и мелкосерийном производстве применяется местный нагрев посредством паяльника или газовой горелки. В крупносерийном и массовом производстве сборочные единицы нагревают в ваннах и газовых печах, а также используют *электронагрев*. Особенно широко применяют *индукционный нагрев ТВЧ*. При этом форму индуктора приспособливают к форме соединяемых деталей, вследствие чего нагрев происходит непосредственно вблизи места спая. Это предохраняет детали от коробления и появления оксидов.

При пайке деталей из алюминиевых сплавов применяют *ультразвуковой нагрев*, так как высокочастотные колебания в расплавленном припое разрушают оксидную пленку и отпадает необходимость во флюсе. Ультразвуковые колебания сообщаются нагревательному элементу паяльника или возбуждаются в расплавленном припое ванны. Паяные соединения контролируют по параметрам режима пайки, внешним осмотром, проверкой на прочность и герметичность, а также методом дефекто- и рентгеноскопии.

Склеивание — один из методов получения неподвижных неразъемных соединений, при котором между сопрягаемыми поверхностями деталей вводится слой клея, способного при определенном физическом состоянии благодаря силам адгезии скреплять эти детали. Одним из важных преимуществ склеивания является возможность получения соединений из разнородных материалов (металлов и неметаллов). В конструкциях машин клеевые соединения применяют либо как самостоятельные, либо в комбинации с другими видами соединений. Например, вместо посадки с натягом используют переходную с введением в зазор клея. Как правило, применение комбинированных клеевых соединений существенно повышает прочность. Недостатки клеевых соединений — сравнительно низкая термостойкость, склонность к старению, необходимость в ряде случаев нагрева соединения при склеивании. Марку клея для того или иного соединения выбирают в процессе конструирования сборочной единицы, исходя из условий ее работы в машине.

При склеивании деталей выполняются следующие этапы: 1) подготовка поверхности; 2) нанесение клея; 3) выдерживание и подсушивание клеевого слоя; 4) соединение деталей и создание условий для отверждения клея; 5) контроль соединения.

Подготовка поверхностей к склеиванию состоит в пригонке и очистке путем травления, дробеструйной и пескоструйной обработки,

обезжиривании. Детали из малоуглеродистых сталей очищают погружением в подогретые до 60 °С растворы фосфорной кислоты (25%-й) или метасиликата (10%-й). Детали из нержавеющей стали очищают погружением в раствор щелочи, из алюминия — в раствор серной кислоты и двуххромокислого натрия, из меди и латуни — в азотную кислоту. После этого необходимы тщательная промывка и принудительная сушка. Обезжиривание производится путем протирки поверхностей растворителем (бензином или ацетоном) или промывкой деталей моющими растворами в моечных установках.

Для нанесения клеев в зависимости от типа производства используют кисть, пульверизатор, ролик, покрытый фетром, специальные шприцы или установки.

После нанесения клея предусматривается открытая выдержка с целью удаления растворителей. Затем осуществляется подсушивание, продолжительность которого зависит от марки клея. Далее производится сборка и отверждение. Обычно этот процесс протекает с выдержкой под давлением и подогревом. Удельные давления в зависимости от формы склеиваемых поверхностей назначают от 5 до 200 МПа. Требуемые силы сдавливания создаются посредством прессов, струбцин или специальных зажимных приспособлений. При необходимости горячего отверждения одновременно с прижимом производят подогрев в термостатах, конвейерных печах или электроподогрев. В качестве примера далее приводятся режимы склеивания клеем марки БФ-2.

Наносятся два слоя клея, открытая выдержка каждого слоя при температуре до 20 °С продолжается 1 ч. Подсушивание первого слоя осуществляется при температуре 60 °С в течение 15 мин, а второго — при температуре 60 °С в течение 15 мин и затем при температуре 90 °С в течение 1 ч. Давление сжатия склеиваемых поверхностей 50...150 МПа. Температура отверждения 140...160 °С в течение часа.

Если при сборке применяются клеи, процесс отверждения которых происходит без нагрева, то продолжительность выдержки значительно увеличивается (часто до 30...36 ч). Контроль клеевого соединения осуществляется путем осмотра, простукивания или ультразвуковыми методами.

3.4. Очистка перед сборкой

Детали (и сборочные единицы) перед сборкой должны быть очищены от антикоррозионно-смазочных материалов, кусочков стружки, опилок, абразивного порошка, остатков обтирочного материала и т. д. Для этого их подвергают мойке и (или) продувке сжатым воздухом.

Процесс мойки условно можно представить состоящим из сле-

дующих подпроцессов: механического воздействия жидкости, смачивания, температурного воздействия, адсорбирования и смыва. Состав моющих жидкостей играет при этом очень большую роль. Они должны разлагать пленки загрязнения, превращая их в растворимые элементы, хорошо смачивать поверхность, препятствовать повторному осаждению растворенных примесей на поверхность детали. В связи с тем что жировые вещества плохо смачиваются водой, в состав моющих жидкостей, кроме неорганических веществ (щелочей), вводят также вещества с поверхностно-активными свойствами (мыло, кислоты, спирты, жидкое стекло, синтетические моющие вещества). Чтобы ослабить влияние щелочной основы растворов на стальные и особенно алюминиевые детали, рекомендуется после мойки в моющих растворах сразу же промыть детали чистой водой. Такой процесс осуществляется в двухкамерной моющей машине, схема которой показана на рис. 3.13.

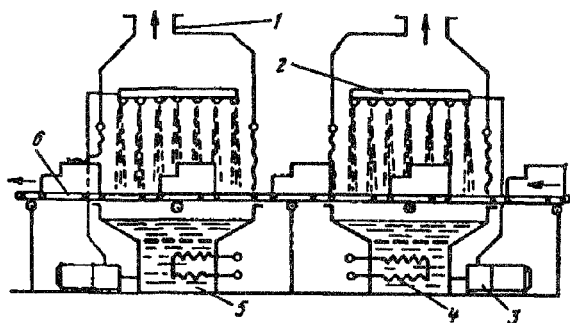


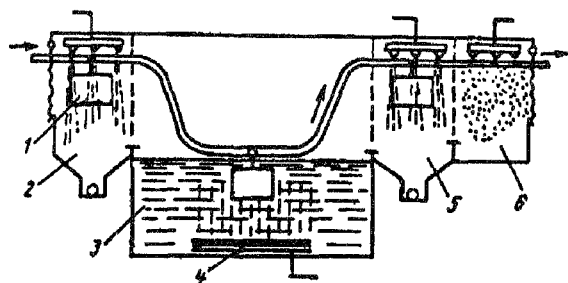
Рис. 3.13. Схема двухкамерной моющей машины

Камеры машины разделены нейтральной зоной длиной 1...1,5 м, а также резиновыми шторами, препятствующими выбрасыванию жидкости. Отфильтрованная моющая жидкость 5 (и ополаскивающая вода во второй камере) насосом 3 подается из сливных баков к душевому устройству 2, которое выполнено в виде труб с насадками, расположенными так, что деталь или сборочная единица омывается сильными струями одновременно со всех сторон. Моющая жидкость подогревается паровым змеевиком 4. Промываемые детали перемещаются в машине на цепном конвейере 6. В верхней части камер размещено вентиляционное устройство 1. Температура раствора и воды 75...85 °С, давление моющей жидкости 25...30 МПа. В зависимости от загрязненности деталей скорость их перемещения в машине может изменяться от 0,5 до 4 мм/мин.

Тщательная очистка достигается промывкой в жидкой среде с помощью ультразвука. В результате возбуждения ультразвуковых колебаний в моющей жидкости образуются кавитационные пузырь-

ки, механически воздействующие на загрязненную поверхность. Возникающие при этом ударные волны интенсивно разрушают слой смазочного материала, грязи и т. п., покрывающий поверхность детали. Одновременно происходит химическое взаимодействие загрязнений и моющей жидкости. Жидкой средой при ультразвуковой мойке являются органические растворители (бензин, спирт), смеси бензина или ацетона со спиртом, а также водные растворы щелочей и синтетических поверхностно-активных веществ. Температура органических растворителей поддерживается на уровне не выше 30°C , а водных растворов — 60°C . Мойка в ультразвуковой ванне продолжается от 1 до 5 мин, в зависимости от конфигурации детали и ее загрязненности. Затем детали (сборочные единицы) промывают в горячей и холодной воде и просушивают в течение 10...15 мин. Схема ультразвуковой моющей установки непрерывного действия показана на рис. 3.14. Детали в корзине 1 поступают в камеру 2, где предварительно промываются горячим ($70\text{...}80^{\circ}\text{C}$) водным раствором тринатрийфосфата. Далее корзина попадает в ванну 3 с тем же моющим раствором при температуре $50\text{...}60^{\circ}\text{C}$, где детали подвергаются воздействию ультразвуковых волн, возбуждаемых излучателем 4. После этого в камере 5 происходит ополаскивание горячей водой, а в камере 6 — сушка подогретым воздухом. Иногда промытые детали для предотвращения коррозии смачивают между камерами 5 и 6 1%-м водным раствором триэтилонамина и 0,2%-м раствором нитрата натрия.

Рис. 3.14. Схема ультразвуковой моющей установки



Большую роль в обеспечении чистоты (незагрязненности) деталей и сборочных единиц играет их обдувка сжатым воздухом непосредственно перед осуществлением соединения. Особенно тщательно необходимо продувать отверстия, пазы, канавки и прочие места, где легче всего задерживаются грязь и пыль. В некоторых случаях целесообразно осуществлять обдувку детали или сборочной единицы в приспособлении, которое направляет поток воздуха именно в те места, где затруднена очистка.

3.5. Балансировка деталей и сборочных единиц

В результате погрешностей изготовления и сборки вращающихся частей (роторов) машины возникает их *неуравновешенность*, т. е. такое распределение масс, которое при вращении вызывает переменные нагрузки в опорах ротора и его изгиб. При эксплуатации машин с неуравновешенными роторами эти нагрузки снижают ресурс машин и качество выполнения ими функций. Неуравновешенность оценивается дисбалансом. *Дисбалансом D* называют векторную величину, равную по модулю произведению неуравновешенной массы m на расстояние l от нее до оси вращения ротора. Дисбаланс как вектор имеет также фазу (рис. 3.15). Все частные дисбалансы D_i ротора в общем случае сводятся к двум векторам — главному вектору \vec{D} и главному моменту M_D . Главный вектор дисбаланса равен геометрической сумме частных дисбалансов. Главный момент дисбаланса равен геометрической сумме моментов частных дисбалансов относительно произвольной точки O , лежащей на линии действия вектора \vec{D} .

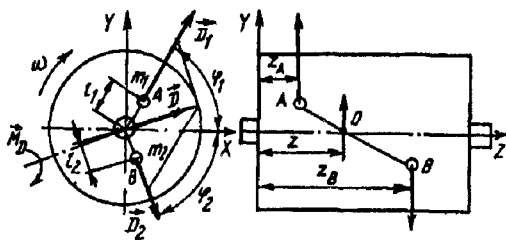


Рис. 3.15. Схема неуравновешенности ротора

Если главный момент дисбаланса равен нулю, то неуравновешенность называют *статической*, а ее устранение — *статической балансировкой*. Если главный вектор дисбаланса равен нулю, то неуравновешенность называют *моментной*. В общем случае, когда и главный вектор, и главный момент не равны нулю, неуравновешенность называют *динамической*. Устранение моментной и (или) динамической неуравновешенностей называют *динамической балансировкой*.

Процесс балансировки ротора состоит из одного или нескольких этапов, в каждом из которых осуществляются следующие типовые процедуры: 1) измерительная (определение значения и фазы дисбаланса); 2) преобразовательная (преобразование полученных данных в параметры технологического метода, принятого для устранения неуравновешенности); 3) корректировочная (устранение неуравновешенности). Последняя процедура состоит в размещении (или удалении) корректирующих масс. При этом главная центральная ось инерции смещается и (или) поворачивается в пространстве, совмещаясь с осью вращения ротора. Измерительные процедуры проводят либо в поле сил тяжести (при неподвижном роторе), либо в поле сил инерции (при вращающемся).

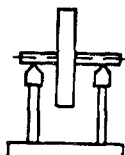
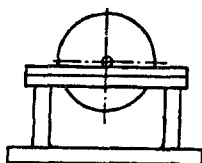


Рис. 3.16. Призматический стенд для статической балансировки

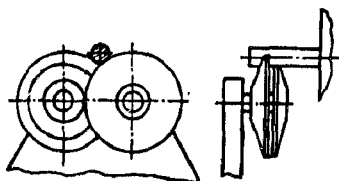
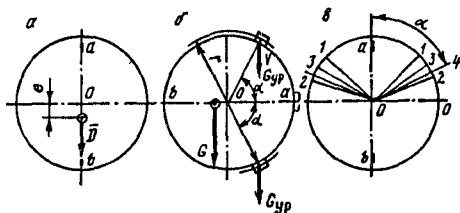


Рис. 3.17. Дисковые опоры стенда для статической балансировки

Рис. 3.18. Схемы определения фазы (а) и значений дисбаланса (б, в)



Методами первой группы можно проводить только статическую балансировку. Для этого ротор с помощью оправки (или шеек собственного вала) устанавливается на опоры стенда для статической балансировки. Опорами служат горизонтальные параллельные призмы (рис. 3.16), пары дисков (рис. 3.17) либо аэростатические полуподшипники. Под действием силы тяжести ротор поворачивается и самоустанавливается так, что главный вектор дисбаланса направляется вертикально вниз. Таким образом определяется фаза (линия ab) дисбаланса (рис. 3.18, а). Значение модуля дисбаланса определяется экспериментально подбором фазы двух уравнивающих грузов известной массы m_{yp} .

Из условия равновесия (рис. 3.18, б) и с учетом того, что $G = mg$, получаем

$$D = 2 r m_{yp} \cos \alpha ,$$

если уравнивание достигается двумя грузами. Но если $D > 2 r m_{yp}$, то применяют третий груз, который устанавливается на линии дисбаланса. Тогда

$$D = r m_{yp} (1 + 2 \cos \alpha) .$$

Одной из достаточно быстрых стратегий поиска значения угла является метод половинного деления, который заключается в том, что после каждой пробы уравнивания область неопределенности делится пополам (рис. 3.18, в). Например, вначале уравнивающие грузы были расположены в точках 1, а после первой пробы

уравновешивания выяснилось, что точка b перешла вверх. Следовательно, необходимо увеличить угол α . Точка 2 делит новую область неопределенности пополам. После установки уравновешивающих грузов в точку 2 точка b вернулась в прежнее положение. Следовательно, необходимо уменьшить угол α , т. е. точкой 3 разделить область неопределенности 1—2 пополам. И так до тех пор, пока не будет найдено уравновешивающее значение угла α с заданной точностью.

Корректировка неуравновешенности осуществляется путем закрепления корректирующих грузов (на крупных роторах) или (чаще всего) удалением части материала ротора методом фрезерования, сверления или эксцентрического растачивания в определенном заранее торцовом сечении. Если корректировка неуравновешенности ведется сверлом постоянного диаметра d , то глубина h сверления на расстоянии r_1 от оси ротора определяется так:

$$h = 0,004 D / (\pi d^2 r_1 \rho),$$

где ρ — плотность материала, кг/мм³.

Если необходимо удалить малый объем материала, применяют электроискровую, лазерную или электронно-лучевую обработку.

Схема определения статической неуравновешенности в поле сил инерции показана на рис. 3.19. Балансируемый ротор 1 устанавливается и закрепляется на столе 9, снабженном фазовой шкалой.

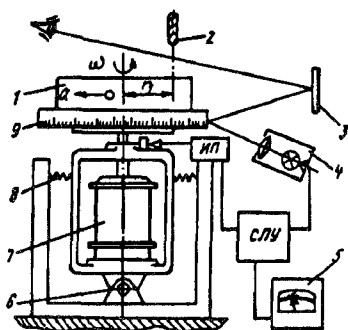


Рис. 3.19. Схема статической балансировки в поле сил инерции

Двигатель 7 сообщает столу с ротором вращение с частотой ω . Силы инерции Q , пропорциональные дисбалансу и ω^2 , с одной стороны, и реакции уравновешивающих пружин 8, с другой, сообщают системе колебания относительно оси 6, которые воспринимаются измерительным преобразователем (ИП). В момент максимального отклонения системы вправо счетно-логическое устройство (СЛУ) зажигает стробоскопическую лампу 4, освещающую

фазовую шкалу, и передает на индикатор 5 сигнал, пропорциональный дисбалансу (значение требуемой глубины сверления h). Оператор видит на экране 3 фазу дисбаланса. После остановки ротора стол вручную поворачивается на нужный угол и сверлом 2 осуществляется сверление на необходимую глубину h .

Аналогично осуществляется динамическая балансировка (рис. 3.20). Ротор 1 с плоскостями коррекции aa и bb устанавливается на опоры стола 7, который может совершать под действием сил инерции Q_1, Q_2 и реакции пружины 6 колебания относительно оси 8, лежащей в одной из плоскостей коррекции (aa). Назначение ИП, СЛУ, индикатора 5, стробоскопической лампы 4, экрана 3 и фазового диска 2 то же, что и аналогичных элементов стенда, схема которого показана на рис. 3.19. Ротор приводится во вращение двигателем 9 через электромагнитную муфту 10. Частота вращения ротора принимается несколько большей, чем резонансная частота собственных колебаний системы.

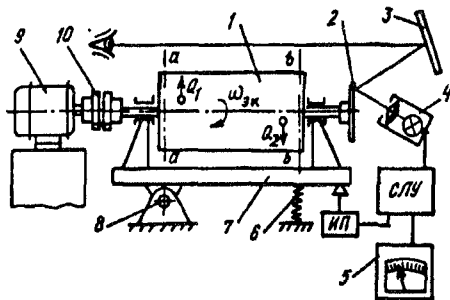


Рис. 3.20. Схема стенда для динамической балансировки

После коррекции неуравновешенности в плоскости bb ротор поворачивается на 180° так, что последняя занимает место плоскости aa , и процесс повторяется.

Точность балансировки характеризуется произведением остаточного удельного дисбаланса e_0 , где $e_0 = D_0/m$, на наибольшую частоту вращения ротора в условиях эксплуатации $\omega_{эк}$. На основании этого критерия ГОСТ 22061—76 предусматривает 13 классов точности (от 0-го до 12-го). Например, требования к точности балансировки шпинделей шлифовальных станков и гироскопов соответствуют 1-му классу точности, а для колес легковых автомобилей, бандажей колесных пар достаточно 6-го класса точности. Международный стандарт МС 1940 разделяет весь диапазон точности балансировки на 11 классов.

Балансировка на дисковых опорах (см. рис. 3.17) обеспечивает $e_0 = 15...25$ мкм, на параллельных призмах (см. рис. 3.16) — $e_0 = 10...80$ мкм, в аэростатических опорах — $e_0 = 3...8$ мкм, на стенде (см. рис. 3.19) — $e_0 = 1...3$ мкм.

3.6. Досборочная размерная обработка

Досборочная размерная обработка (пригонка) применяется в условиях серийного и единичного производства, когда необходимую точность размеров и формы деталей экономически невыгодно обеспечивать при изготовлении в механических цехах предприятия. В результате пригонки обработанная деталь годится только для дан-

ной сборочной единицы. Наиболее распространенными видами пригоночных работ являются опилование, шабрение и притирка.

Различают размерное *опилование* и *зачистку*, когда в результате обработки достигается требуемое качество поверхности, удаляются заусенцы, сколы и царапины. Инструментом при опиловании служат напильники и абразивные бруски. По назначению напильники можно разделить на следующие группы: слесарные общего назначения, надфили, специальные и машинные.

С л е с а р н ы е н а п и л ь н и к и общего назначения с длиной рабочей части от 100 до 400 мм можно разделить по форме поперечного сечения на семь типов: плоские, квадратные, трехгранные, круглые, полукруглые, ромбические и ножовочные. В зависимости от числа насечек на 10 мм длины различают напильники с насечкой шести номеров (от 0-го до 5-го).

Специальные напильники предназначены для конкретных работ. Например, пазовые напильники — для узких пазов, напильники с фрезерованными зубьями — для опилования чугуна и цветных сплавов. Надфили — это мелкие напильники длиной от 40 до 80 мм, предназначенные для лекальных работ и обработки в труднодоступных местах.

М а ш и н н ы е н а п и л ь н и к и применяются для опиловочных станков с вращательным рабочим движением (борнапильники) и с возвратно-поступательным движением (стержневые). Борнапильники имеют рабочую головку цилиндрической, конической, сферической, тороидальной или факельной формы с насеченными или фрезерованными (вышлифованными) зубьями и хвостовик. Стержневые напильники отличаются от слесарных наличием хвостиков для закрепления в станке.

Тип напильника выбирается в зависимости от формы обрабатываемой поверхности, а номер насечки — в зависимости от требований к качеству опиловываемой поверхности (табл. 3.5).

Табл. 3.5. Показатели качества поверхности после опилования

Вид опилования	Номера насечки	Толщина удаляемого слоя, мм	Погрешность размера, мм	Параметр шероховатости R_a , мкм
Предварительное	0,1	0,5...1	0,2...0,3	15...30
Чистовое	2,3	0,15...0,3	0,05...0,15	3,2...10
Тонкое	4,5	0,05...0,1	0,01...0,05	1,25...2,5

Абразивные бруски применяются для чистового и тонкого опилования деталей из закаленной стали. Для этой же цели используют

алмазные напильники и надфили, у которых вместо насечки нанесен алмазоносный слой.

Для механизации процесса опиливания применяются опилочочные и опилочочно-зачистные станки, а также механизированный ручной инструмент. Ручное опиливание предъявляет высокие требования к квалификации рабочего и требует значительных затрат труда. Обрабатываемая заготовка закрепляется в тисках или специальным приспособлении, а рабочие движения напильнику сообщает рабочий вручную.

На опилочочных станках напильнику механически сообщается возвратно-поступательное движение. Заготовка устанавливается на стол, который можно наклонить на заданный угол в трех плоскостях, и вручную перемещается по плоскости стола (движение подачи) для обеспечения необходимых формы и размеров.

На опилочочных станках с гибким валом используются борнапильники или абразивные головки. Эти станки бывают стационарными, передвижными или подвесными. Заготовки при опиливании с помощью таких станков закрепляются в тисках.

Шабрением называется окончательная обработка незакаленных поверхностей путем соскабливания тонких стружек инструментом, который называется *шабером*. Шабрение обеспечивает хорошее прилегание сопрягаемых поверхностей, высокую точность формы плоских поверхностей (направляющих станин, столов, кареток) и подшипников скольжения. На рис. 3.21 показаны схемы рабочих частей и движений обычных шаберов (а, б), а также трехгранного изогнутого (в).



Рис. 3.21. Схемы рабочих частей и движений шаберов

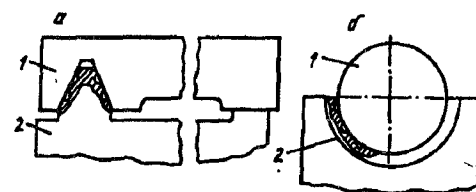


Рис. 3.22. Схема обнаружения мест удаления материала при шабрении с помощью эталона: а — шабрение направляющих; б — шабрение вкладыша; 1 — эталон; 2 — деталь

При шабрении шабером снимаются выступающие участки обрабатываемой поверхности. Для их обнаружения используют эталонные контрповерхности (рис. 3.22). На рабочую поверхность эталона тампоном наносят тонкий слой шабровочной краски (обычно смесь индустриального масла с

порошком глазури или сажи с автолом и керосином). В местах контакта эталонной и обрабатываемой поверхностей на последней формируются пятна, которые указывают участки, подлежащие обработке. Универсальными эталонами являются шабровочные (контрольные) плиты и линейки (прямые и угловые).

Шабрить поверхность целесообразно под углом $30...45^\circ$ к рискам и следам, оставшимся после предыдущей обработки. Различают четыре вида шабрения: предварительное, получистовое, чистовое и тонкое. Контроль качества шабрения осуществляется по размерам и равномерности распределения пятен, оставляемых на обработанных поверхностях эталоном. Для контроля применяют проверочную рамку с окном 25×25 мм. Параметром качества шабрения является среднее число пятен в окне проверочной рамки. Предварительное шабрение заканчивается при числе пятен $4...6$, получистовое — при $8...15$, чистовое и тонкое — при $20...25$ (проверка на блеск).

Трудоемкость шабрения чрезвычайно высока. Поэтому там, где оно широко применяется, используют механизированный инструмент, в котором шабер получает движение от гибкого вала, встроенного электро- или пневмодвигателя. Эффект повышения производительности достигается за счет резкого увеличения частоты рабочих ходов по сравнению с ручным шабрением.

Притирка применяется для получения герметичных подвижных соединений в клапанах, кранах, плунжерах, золотниках и т. д. При этом сопрягаемым поверхностям придается одинаковая форма. Если при притирке достигается еще и высокая точность размера, то ее называют *доводкой*.

Существуют два способа притирки: 1) притирка сопрягаемых деталей непосредственно друг к другу с помощью абразивных порошков или паст, наносимых на притираемые поверхности (рис. 3.23, а); 2) притирка поверхности по специальному инструменту — притиру, в подповерхностный слой которого абразивный материал вдавливается (шаржируется) и подается на него в виде суспензии или пасты (рис. 3.23, б).

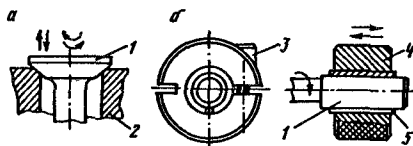


Рис. 3.23. Схема притирки:
а — взаимной; б — с помощью притира; 1, 2 — притираемые детали; 3 — регулировочный винт; 4 — корпус; 5 — притир

На притирку детали поступают после чистового шлифования или тонкой обработки лезвийным инструментом (квалитеты точности 6, 7, параметр шероховатости $Ra = 3,2...5$ мкм). В зави-

симости от требуемого качества и точности различают предварительную (черновую), чистовую и тонкую притирку (табл. 3.6).

Табл. 3.6. Показатели качества поверхности после притирки

Вид притирки	Зернистость абразива	Точность, мкм	Параметр шероховатости R_a , мкм	Количество переходов	Толщина удаляемого слоя, мкм
Предварительная	M40...M14	3...5	0,32...0,1	1	30...50
Чистовая	M10...M5	1...2	0,16...0,04	2	10...20
Тонкая	M1...M3	0,01...0,5	0,08...0,02	4	3...10

Различают твердые абразивные материалы, твердость которых выше твердости закаленной стали, и мягкие. Наиболее часто применяются следующие твердые абразивные материалы: электрокорунд нормальный, белый и хромистый (1А, 2А, 3А), карбид кремния зеленый (6С) и черный (5С), карбид бора (КБ), эльбор (Л) и алмаз синтетический (АС). Мягкие абразивные материалы являются оксидами различных металлов (хрома, железа, алюминия).

Жидкая фаза притирочной смеси состоит из связующего и разжижающего материалов и поверхностно-активной добавки. В качестве связующего материала применяют: технический стеарин, парафин, церезин, канифоль, петролатум, воск и др. В качестве разжижающих материалов используют: индустриальное, костное и другие масла, воду, керосин, скипидар. Поверхностно-активными веществами являются: анилин солянокислый, молочная кислота, этиленгликоль, олеин, стеарин, ортофосфорная кислота и др. Они повышают эффективность притирки в 1,5...3 раза. Чтобы снизить вероятность схватывания при трении, в пасты добавляют антиадгезионные присадки и твердые смазочные материалы (дисульфид молибдена, графит, серу).

Абразивные пасты и суспензии в основном изготавливают в соответствии с техническими требованиями потребителей. Исключения составляют алмазные пасты, пасты на основе эльбора и пасты ГОИ, которые изготавливаются серийно в соответствии с ГОСТами.

Конструкция и размеры притира зависят от формы и размеров обрабатываемой поверхности. Для притирки плоских поверхностей применяют: плиты-притиры прямоугольной формы (рис. 3.24, а) и диски-притиры (рис. 3.24, б). Последние применяются для механизированной притирки. По геометрической форме рабочих поверхностей притиры делятся на гладкие и с канавками. Отсутствие

Рис 3.24 Притиры для плоскостей

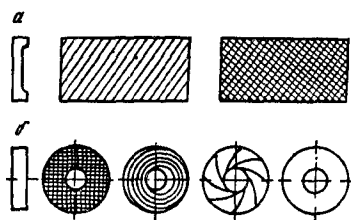


Рис. 3.25. Притир для длинных наружных цилиндрических поверхностей

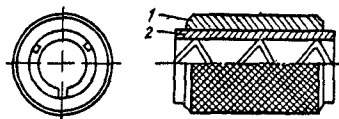
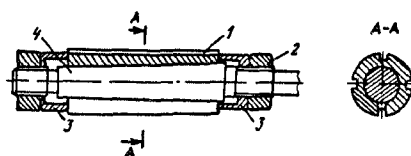


Рис 3.26 Притир для цилиндрических отверстий



86, 87

канавок затрудняет подвод абразивных зерен в зону обработки, особенно в центральные участки притираемой заготовки. Поэтому на таких притирах притираемая плоскость получает некоторую выпуклость. Канавки на рабочей поверхности притира способствуют подаче абразивной суспензии равномерно ко всем участкам обрабатываемой поверхности. Кроме того, вид канавок позволяет управлять равномерностью изнашивания рабочей поверхности притира. Притиры с канавками в виде сетки или спиралей на 25...80% повышают производительность процесса по сравнению с гладкими притирами, однако при этом увеличивается параметр шероховатости Ra притираемой поверхности.

Притиры для обработки наружных цилиндрических поверхностей показаны на рис. 3.23, б и 3.25 (первый для коротких, а второй для длинных поверхностей). Регулирование диаметра рабочей поверхности осуществляется либо за счет деформации корпуса 4 винтом 3 (рис. 3.23, б), либо за счет осевого смещения притира 2 по отношению к корпусу 1 (рис. 3.25).

Типовая конструкция притира для цилиндрических отверстий показана на рис. 3.26. На рабочую поверхность притира наносятся винтовые перекрещивающиеся канавки. Регулировка диаметра притира 1 осуществляется его осевым сдвигом по отношению к конической оправке 4 с помощью гаек 2 и втулок 3. В процессе регулирования диаметра притиров для обработки цилиндрических поверхностей возникает погрешность формы рабочей поверхности,

которая при чистовой притирке не должна превышать 0,01 мм в продольном и поперечном сечениях.

Наилучшие результаты получаются при обработке притирами, у которых перекрещивающиеся канавки нанесены на половине длины. Часть притира, лишенная канавок, является калибрующей, обеспечивая незначительный съем за счет шаржированного абразива.

Материал притира выбирают в зависимости от материала и его твердости, а также от требуемой шероховатости поверхности детали. Чаще всего для притиров используют чугун, сталь, латунь, оптическое стекло, текстолит. При притирке стальных деталей наибольшее распространение получили чугунные притиры. В некоторых случаях, в особенности при обработке высокоточных отверстий, применяют притиры из сталей Ст3, А12 с твердостью 150...200 НВ. Для притирки деталей из алюминиевых или медных сплавов целесообразно применять притиры из оптического стекла ПКР. Так как в процессе притирки рабочая поверхность притира, неравномерно изнашиваясь, приобретает погрешность формы, ее необходимо периодически править (либо шлифованием, либо притиркой).

Для механизации притирки используют приспособления и притирочные станки, где притиру и (или) притираемым деталям сообщается требуемое относительное движение. Скорость выбирается в пределах 40...100 м/мин при предварительной, 15...30 м/мин при чистовой и 5...10 м/мин при тонкой притирке. Давление на поверхности контакта устанавливается 0,1...0,15 МПа при предварительной, 0,05...0,1 МПа при чистовой и не более 0,02 МПа при отделочной притирке стальных деталей.

3.7. Досборочная совместная обработка

Досборочная совместная обработка отверстий выполняется, когда требуемая точность легче всего достигается путем обработки двух или большего числа деталей в сборе (рис. 3.27). Отверстия под стопор 3 детали 1 сверлят с поддержанием расстояния L , используя готовые отверстия сопрягаемой детали 2 в качестве направляющих элементов сверла (рис. 3.27, а). Обработка резьбового отверстия под стопор 3 осуществляется, когда деталь 2 уже напрессована на деталь 1 (см. рис. 3.27, б). В сборочных цехах для такой обработки используют механизированные приспособления (электрические и пневматические дрели), переносные и стационар-

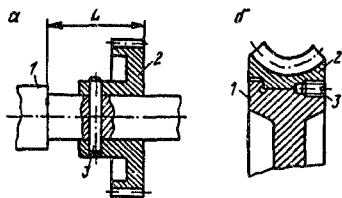


Рис. 3.27. Соединения, требующие совместной обработки:
а — «вал — шестерня»; б — «корпус — зубчатый венец»

ные сверлильные станки. При работе механизированным инструментом возможны перекося и (или) «разбивка» отверстия (увеличение диаметра, конусность, овальность). Лучшее качество обеспечивается при закреплении механизированных приспособлений на стойке или жесткой подвеске. Там, где это возможно по условиям сборки, следует для направления сверла использовать кондуктор.

В зависимости от конструкции соединения и требуемой точности возможны следующие варианты сочетаний способов обработки: 1) сверление; 2) сверление и нарезание резьбы; 3) сверление и развертывание; 4) сверление, зенкерование и развертывание.

Развертывание или зенкерование с развертыванием после сверления выполняется для получения требуемой посадки или для обеспечения соосности отверстий монтируемых деталей. Толщина слоя металла, снимаемого при развертывании, колеблется от 0,03 до 0,3 мм и зависит от диаметра отверстия. При обработке больших отверстий применяют несколько разверток с последовательно увеличивающимся диаметром.

При совместной обработке детали следует надежно закреплять. Для этого применяются соответствующие приспособления.

3.8. Контроль при сборке

Контроль качества сборки играет существенную роль в обеспечении качества собираемой машины. При сборке производится контроль: 1) размеров и расстояний; 2) относительного положения элементов машины (относительных поворотов); 3) формы и прилегания поверхностей; 4) зазоров в соединениях; 5) герметичности соединений; 6) биения вращающихся элементов; 7) плавности и энергетических затрат на движение элементов машины без нагрузки. Кроме того, осуществляется испытание собранных функциональных единиц машины и машины в целом. В зависимости от вида, назначения и масштаба выпуска машины (и их функциональные единицы) проходят испытания на холостом ходу (проверка работы механизмов и паспортных данных) и в работе под нагрузкой, а также испытания на точность, жесткость и производительность.

Средства контроля выбираются с учетом их метрологических характеристик (допустимая погрешность измерения обычно не превышает 20% допуска на контролируемый параметр), конструктивных особенностей и размеров объекта контроля, а также с учетом экономических соображений (производительность и уровень автоматизации контроля).

Контроль размеров в процессе сборки осуществляется либо при досборочной сортировке деталей по размерам, либо во время пригоночной размерной обработки. Например, на рис. 3.28 показана схема контроля расстояния A между осью шпинделя l и плоскостью

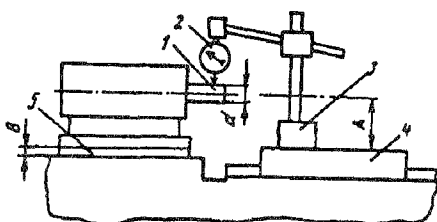


Рис. 3.28. Схема контроля расстояния A

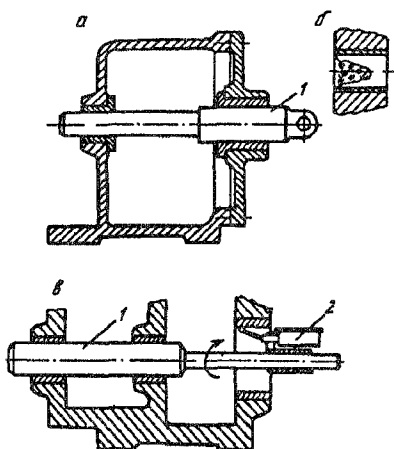


Рис. 3.29. Схемы контроля соосности с помощью макетного вала и индикатора

шабровочной краски, а на полувтулках (вкладышах) подшипника получаются отпечатки. Форма отпечатка при несоосности имеет вид, показанный на рис. 3.29, б. При высоких требованиях к точности расположения осей контроль соосности осуществляется с помощью индикатора 2, закрепленного на макетном валу (рис. 3.29, в).

Схема контроля параллельности ходового вала 3 направляющим 4 каретки 1 показана на рис. 3.30. Контроль проводится в двух плоскостях индикаторами магнитной стойки 2, установленной на каретке. Схема контроля параллельности осей подшипников головок шатуна показана на рис. 3.31. Шатун 2 поворачивают на оправке 1 до тех пор, пока оправка 4 не придет в соприкосновение с опорой 5. Индикаторы 3 и 6 измеряют непараллельность осей, а индикатор 7 — угол скрещивания.

Суммарную погрешность изготовления и сборки, приводящую к непараллельности рабочих поверхностей зубьев цилиндрических зубчатых колес, можно проверить «на краску», как это показано на рис. 3.32. Краску наносят на зубья одного из колес пары (а),

стола 4, которое обеспечивается досборочной пригоночной размерной обработкой плиты-компенсатора 5. Необходимый размер обработки B определяется по результатам измерения с помощью стойки 3 и индикатора часового типа 2, настроенного на необходимый размер $A + d/2$ по набору концевых мер. В массовом производстве для контроля размеров и расстояний применяют простые и комплексные калибры, приспособления и сортировочные автоматы.

Наиболее часто при сборке производится контроль параметров относительного положения. На рис. 3.29 изображены схемы контроля соосности втулок подшипников с помощью макетного вала 1 (рис. 3.29, а), который является по сути калибром на соосность. Если подшипники разъемные, то хорошие результаты дает контроль «на краску». При этом на макетный вал наносится тампоном тонкий слой

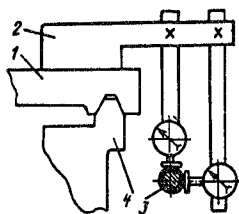


Рис. 3.30. Схема контроля параллельности ходового винта относительно направляющих

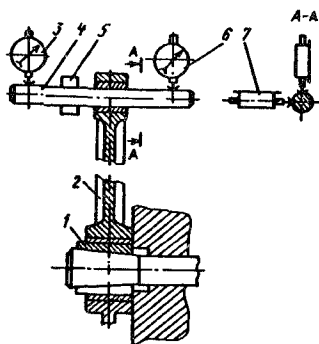


Рис. 3.31. Схема контроля параллельности осей подшипников головок шатуна

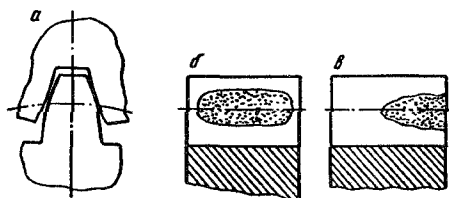


Рис. 3.32. Схема контроля параллельности рабочих поверхностей в зубчатом зацеплении

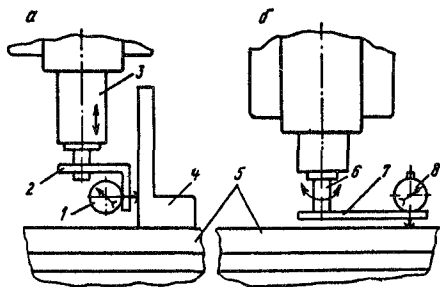


Рис. 3.33. Схемы контроля перпендикулярности к столу станка: а — направления перемещения пиноли; б — оси вращения шпинделя; 1,8 — индикаторы; 2,7 — державки; 3 — пиноль; 4 — угольник; 5 — стол; 6 — шпиндель

а на зубьях другого при повороте получают отпечатки (б, в). Если рабочие поверхности зубьев параллельны, то отпечатки имеют вид, показанный на рис. 3.32, б, а если нет — 3.32, в.

Схемы контроля перпендикулярности приведены на рис. 3.33. Индикаторы 1 и 8 обеспечивают отсчет погрешности с заданной точностью при перемещении пиноли 3 или вращении шпинделя 6.

Схема контроля биения сборочной единицы «зубчатое колесо — вал» показана на рис. 3.34. Вал 1 шейками устанавливается в призмы 8 и 6. Осевое движение вала ограничивается шаровым упором 5. Индикатор 4 контролирует торцовое, а 3 — радиальное

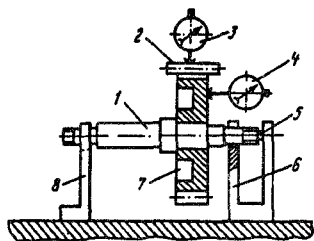


Рис. 3.34. Схема контроля радиального и торцового биения сборочной единицы «зубчатое колесо — вал»

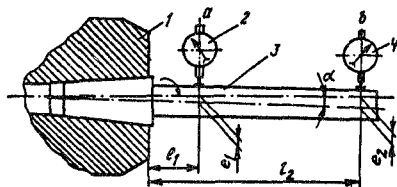
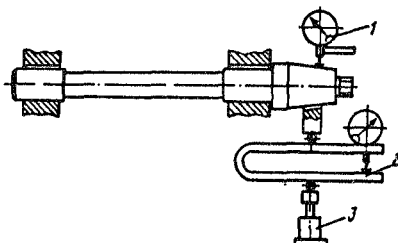


Рис. 3.35. Схема контроля биения оси конического отверстия шпинделя станка

Рис. 3.36. Схема контроля зазора в подшипниках шпинделя



90

биение делительного диаметра шестерни 7. Для контроля радиального биения между зубьями шестерни устанавливается калибр 2, диаметр которого определяется выражением $d = 1,68 m$, где m — модуль зацепления. Контроль осуществляется при перекалывании калибра через один-два зуба в течение одного оборота зубчатого колеса. Биение равно размаху показаний индикатора 3.

Биение оси конического посадочного отверстия шпинделя 1 контролируется с помощью контрольной оправки 3 и индикаторов 2, 4 (рис. 3.35). Данные измерения биения в сечениях a и b позволяют определить биение Δ , приведенное к торцу шпинделя, и угол α перекоса осей:

$$\Delta = \Delta_1 - 2l_1 \alpha; \alpha = (\Delta_2 - \Delta_1) / (2(l_2 - l_1)),$$

где Δ_1, Δ_2 — биения в сечениях a и b соответственно; $\Delta_1 = 2e_1$; $\Delta_2 = 2e_2$; e_1, e_2 — смещения осей в сечениях a и b .

Схема контроля радиального зазора в подшипниках шпинделя показана на рис. 3.36. С помощью домкрата 3 шпиндель нагружается заданной радиальной силой, значение которой определяется динамометром 2. Зазор контролируется индикатором 1 и равен размаху показаний до и после нагружения.

Для контроля бокового зазора C в зацеплении зубчатых колес редуктора 1 (рис. 3.37) на валах колес закрепляются рычаги 3 и 4.

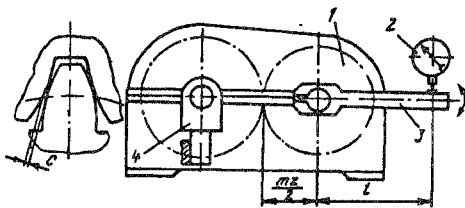


Рис 3.37 Схема контроля бокового зазора в зацеплении пары зубчатых колес

Положение рычага 4 фиксируется, а рычаг 3 покачивается в пределах зазора, который определяется по формуле

$$C = \Delta mz / (2l),$$

где Δ — размах показаний индикатора 2; m — модуль; z — число зубьев шестерни 1, l — база измерения.

Важным этапом сборки является испытание сборочных единиц перед общим монтажом. Испытания проводятся на стендах, оснащенных контрольно-измерительной аппаратурой для измерения мощности, крутящего момента, шума, вибраций, температуры, перемещений и др. Нагружение крутящим моментом осуществляется либо с помощью тормозных устройств (фрикционных, порошковых, электрических или гидравлических), либо путем создания натяга (упругих деформаций) в кинематической цепи двух испытываемых сборочных единиц, например редукторов, соединенных в замкнутый контур (рис. 3.38). Нагружение радиальной и осевой силами осуществляется при необходимости гидравлическими нагружающими устройствами.

Стенды для испытания сборочных единиц должны обеспечивать максимальное приближение режима испытаний к эксплуатационному режиму и сходство условий работы. Стендовые испытания позволяют: определять работоспособность сборочной единицы в отношении прочности ее элементов; выявлять и устранять обнаруженные дефекты, вызывающие ненормальное изнашивание; производить первоначальную приработку подвижных соединений; проверять и регулировать работу фрикционных и предохранительных муфт, муфт сцепления, тормозов; проверять равномерность и плавность движения, нагрев подшипников, бесперебойность подачи смазочного материала.

Продолжительность испытания и характер нагружения регламентируются техническими требованиями к испытываемой сборочной единице.

На точность обычно испыты-

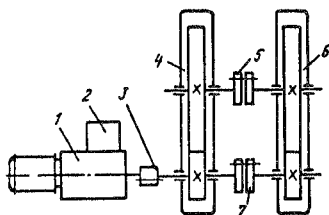


Рис. 3.38. Схема испытания редукторов, соединенных муфтами в замкнутый контур с натягом:

1 — привод; 2 — индикатор крутящего момента (мощности); 3 — соединительная муфта; 4,6 — редукторы 5,7 — муфты

вают машины, которые производят, сортируют либо контролируют продукцию. Контроль на точность должен дать заключительную оценку состояния машины — ее способности производить продукцию заданного качества. Поэтому оценку точности машин при проведении испытаний дают по результатам ее действия: по точности изготовления, измерения или сортировки. Для машин распространенных типов порядок проведения испытаний на точность, образцы изготавливаемой продукции и требования к их качеству регламентированы государственными стандартами.

Причины отклонения точности металлорежущих станков от заданного уровня можно обнаружить по результатам контроля их точности без нагрузки (параллельность, перпендикулярность, соосность, биение и т. д.) и жесткости. Нормы точности и жесткости станков, а также методы их испытаний стандартизованы.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Изобразите схему запрессовки втулки с применением приспособления для ориентации.
2. Изобразите схему двухкамерной моечной машины.
3. Изобразите схему стенда для статической балансировки в поле сил инерции.
4. Изобразите схему стенда для динамической балансировки в поле сил инерции.
5. Изобразите схемы рабочих частей и движений шаберов для обработки плоских и цилиндрических поверхностей.
6. Изобразите схему механизации взаимной притирки.
7. Изобразите варианты схем контроля расстояний при сборке.
8. Изобразите варианты схем контроля соосности при сборке.
9. Изобразите схему контроля параллельности направляющих и ходового винта при сборке токарного станка.
10. Изобразите схему контроля параллельности осей головки шатуна.
11. Изобразите схему контроля параллельности рабочих поверхностей в зубчатом зацеплении.
12. Изобразите схему контроля перпендикулярности оси вращения шпинделя к рабочей поверхности стола при сборке сверлильного станка.
13. Изобразите схему контроля бокового зазора в зацеплении зубчатых колес.
14. Изобразите схему контроля радиального биения зубчатого венца после сборки колеса с валом.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА ИЗГОТОВЛЕНИЯ МАШИН

4.1. Базирование при сборке и механической обработке

В общем случае *базированием* называется ориентация элемента машины или заготовки относительно выбранной системы координат. Применительно к сборке под базированием понимают придание детали или сборочной единице требуемого положения относительно других деталей или сборочных единиц машины. При механической обработке заготовок на станках базированием принято считать придание заготовке требуемого положения относительно элементов станка, определяющих траектории движения подачи.

Поверхности, линии и точки детали или заготовки, используемые для базирования, называют *базами*. По назначению различают конструкторские, сборочные, технологические и измерительные базы.

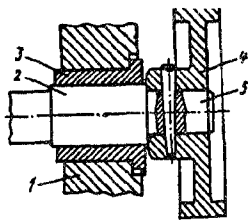


Рис. 4.1. Сборочная единица с основными и вспомогательными сборочными базами

Конструкторские базы используются при проектировании машины для простановки размеров, расстояний и относительных поворотов. *Сборочные базы*, которые применяются при сборке машины, делятся на основные и вспомогательные. *Основные базы* данной детали служат для ее ориентации в сборочной единице или машине. А *вспомогательные базы* данной детали служат для присоединения к ней другой детали. При сборке соединений основные базы одной детали соприкасаются со вспомогательными базами другой. Так, например, шейка 2 вала (рис. 4.1) является основной, а шейка 5 — вспомогательной базой. Первая соприкасается со вспомогательной базой втулки 3 корпуса 1, а вторая — с основной сборочной базой шкива 4.

Технологические базы определяют положение заготовки во время ее обработки на станке.

Измерение расстояний и поворотов какой-либо поверхности детали всегда производится относительно другой поверхности, линии или точки, которые являются *измерительной базой*.

Следующим уровнем классификации является число налагаемых базой связей. Из курса теоретической механики известно, что свободное твердое тело имеет шесть степеней свободы, т. е. может двигаться вдоль любой из трех осей декартовой системы координат и вращаться вокруг этих осей.

В теории базирования принято считать, что точка соприкосновения (сопряжения) базируемой детали (или заготовки) с другим твердым телом является идеальной связью (связью без трения). Эта связь лишает базируемую деталь одной степени свободы — в направлении нормали N к поверхности в точке A соприкосновения (рис. 4.2).

Чаще всего в качестве баз используются плоские и цилиндрические поверхности в различных сочетаниях, реже — конические и сферические. Три точки, не лежащие на одной прямой и лишаящие деталь трех степеней свободы, образуют *установочную базу*. Обычно эти точки принадлежат плоскости, реже — сфере. Две точки, лежащие на одной прямой и лишаящие деталь двух степеней свободы, образуют *направляющую базу*. Точки направляющей базы принадлежат обычно плоскости, которая пересекается с установочной базой или образующей цилиндра. Прямая, соединяющая точки направляющей базы, не должна быть перпендикулярна к установочной базе (плоскости, проходящей через три точки). Ось цилиндра, на поверхности которого выбрана направляющая база, должна быть параллельна установочной. База, которая налагает только одну связь, называется *опорной*. На рис. 4.3, а показаны точки сопряжения установочной ($У_1, У_2$ и $У_3$), направляющей ($Н_1$ и $Н_2$) и опорной ($О$) баз.

База, лишаящая объект четырех степеней свободы, называется *двойной направляющей*. Точки сопряжения такой базы ($ДН_1, ДН_2, ДН_3$ и $ДН_4$) показаны на рис. 4.3, б. Обычно двойной направляющей базой является «длинная» цилиндрическая поверхность, точки сопряжения которой расположены на двух параллельных образующих, не лежащих в диаметральной плоскости.

Две точки сопряжения, лежащие на одной окружности, которая принадлежит «короткой» цилиндрической поверхности, образуют *двойную опорную базу* (точки $ДО_1$ и $ДО_2$ на рис. 4.3, в). Линия, соединяющая эти точки, будет параллельна установочной базе ($У_1, У_2, У_3$). Три точки окружности, принадлежащей конусу, образуют *тройную опорную базу* ($ТО_1, ТО_2$ и $ТО_3$ на рис. 4.3, г). При

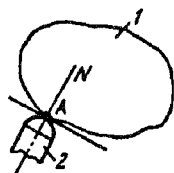


Рис. 4.2. Схема действия базы при соприкосновении с опорой:

1 — базируемая заготовка; 2 — опора

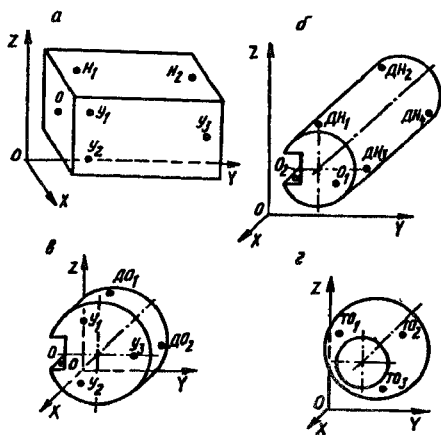


Рис. 4.3. Схема расположения точек сопряжения на базах, налагающих разное число связей

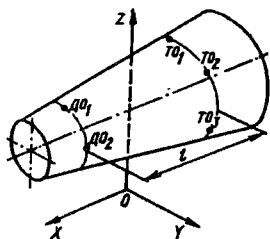


Рис. 4.4. Схема расположения точек сопряжения на «длинном» конусе

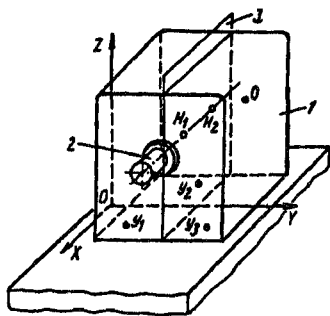
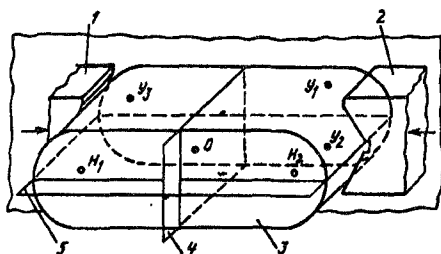


Рис. 4.5. Использование скрытой базы в виде оси (H_1, H_2) при сборке

таким базированием у «короткого» конуса остаются еще три степени свободы, т. е. возможность вращения вокруг трех перпендикулярных осей, проходящих через точку пересечения нормалей, проведенных из точек TO_i . «Длинный» конус за счет тройной и двойной опорных баз лишается пяти степеней свободы (рис. 4.4). Вторая окружность связана с первой выбором расстояния l и поэтому налагает только две связи, а не три, как первая.

Третий уровень классификации баз характеризует вид их проявления. Реальные поверхности, линии и точки их пересечения относятся к *явным* базам, а условные точки, линии и плоскости (например, симметрии) — к *скрытым*. Пример использования скрытой базы при сборке показан на рис. 4.5. В данном случае необходимо, чтобы ось вала 2 сборочной единицы 1 совпала с осью X. Установочная база (Y_1, Y_2, Y_3) обеспечивает расположение оси

Рис. 4.6. Использование скрытых баз (H_1, H_2, O) при механической обработке



вала 2 в плоскости XO_1Y ; опорная (O) обеспечивает необходимое расстояние вдоль оси X . Направляющей базой (H_1, H_2) является условная вертикальная плоскость 3, проведенная через ось вала 2.

На рис. 4.6 приведен пример использования скрытых направляющей (плоскость симметрии 5) и опорной (плоскость симметрии 4) баз при установке заготовки 3 в сдвигаемых призмах 1, 2.

Для сохранения полученного при базировании относительного положения детали (или заготовки) под действием нагрузок, возникающих во время работы машины (обработки заготовки), необходимо силовое замыкание. Силы (моменты сил), создающие силовое замыкание, должны быть больше сил (моментов), стремящихся нарушить относительное положение объекта, которое было получено при базировании. Для создания силового замыкания используются: 1) упругие деформации отдельных деталей или механизмов; 2) силы трения; 3) сила тяжести; 4) давление жидкости или газа; 5) магнитные и электромагнитные силы; 6) сочетание различных силовых факторов.

Теоретической схемой базирования или просто схемой базирования, используемой при проектировании технологических процессов, будем называть эскиз детали (или заготовки), на котором нанесены условные обозначения (рис. 4.7, а) точек сопряжения, которые располагаются заостренной частью к базам, в том числе и скрытым. На видимых поверхностях эскиза условные обозначения точек изображаются сплошными, а на невидимых (закрытых изображением детали) — штриховыми тонкими линиями (рис. 4.7, б). Допустимо считать деталь (заготовку) прозрачной и изображать условные обозначения точек сопряжения на видимых и невидимых поверхностях, включая скрытые базы, сплошными тонкими линиями (рис. 4.8). Точки сопряжения на эскизах нумеруются, начиная с базы, отнимающей наибольшее число степеней свободы. Схемы базирования можно разделить на три класса.

Первый класс объединяет варианты схем базирования, в которых главной является установочная база (плоскость) I, лишающая трех степеней свободы. Эта плоскость сочетается в комплект баз с направляющей II и опорной III (рис. 4.8) либо с двойной

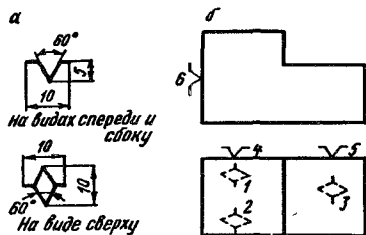


Рис. 4.7. Условное обозначение точек сопряжения (а) и пример теоретической схемы базирования заготовки по трем плоским базам (б).

1...6 — опорные точки

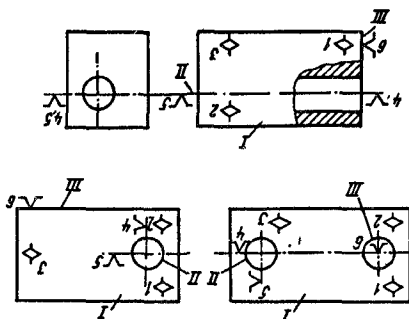


Рис. 4.8. Варианты схем базирования первого класса:

I — главная установочная база; II — двойная опорная база; III — опорная база

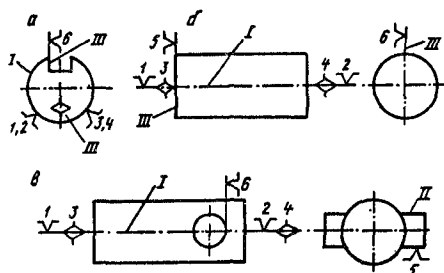


Рис. 4.9. Варианты схем базирования второго класса:

I — главная установочная (двойная направляющая) база; II, III — опорные базы

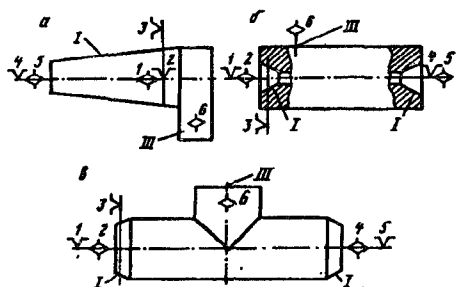


Рис. 4.10. Варианты схем базирования третьего класса:

I — главная установочная база, налагающая 5 связей; III — опорная база

опорной II и опорной III (рис. 4.8). Второй класс объединяет варианты схем базирования, в которых главной является двойная направляющая база («длинный» цилиндр), лишаящая четырех степеней свободы. Эта цилиндрическая поверхность сочетается в комплект баз либо с двумя опорными (рис. 4.9, а, б), либо с двойной опорной (рис. 4.9, в) базами. К третьему классу относятся варианты схем базирования, в которых главная база реализуется либо «длинным» конусом (рис. 4.10, а), либо двумя

«короткими» соосными (рис. 4.10, б, в) конусами, которые лишают деталь пяти степеней свободы. Эти конические поверхности сочтуются в комплект баз с одной опорной.

Разработка схемы базирования является одним из важных этапов проектирования технологического процесса изготовления детали. При этом выбранный комплект баз должен обеспечить в первую очередь относительные повороты (параллельность или перпендикулярность к направлению подачи), а затем только — относительные расстояния.

В технологии машиностроения применяют три метода базирования: 1) по разметке; 2) выверкой; 3) сопряжением. *Базирование по разметке* применяется в единичном и мелкосерийном производстве, а также при обработке крупногабаритных заготовок. Технологической базой в данном случае являются линии разметки 2 (рис. 4.11). Контроль их положения, например при установке в приспособлении-спутнике, осуществляется штангенрейсмусом 4. Регулировка положения заготовки 1 выполняется домкратами 3 и кулачками 5. К недостаткам данного метода следует отнести низкую точность (0,8...1,3 мм), высокие требования к квалификации рабочего, низкую производительность, а к достоинствам — возможность проверки пригодности заготовки до начала ее обработки и наиболее рационального размещения контура детали в теле заготовки.

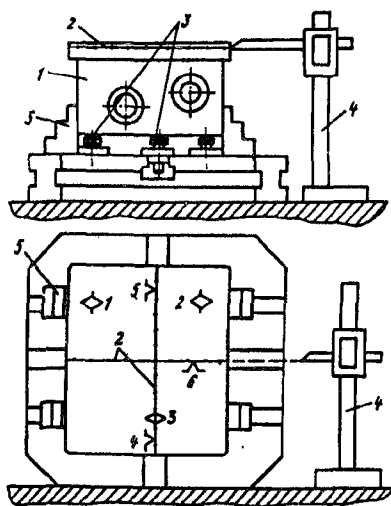


Рис. 4.11. Схема базирования заготовки в приспособлении-спутнике по разметке

При *базировании выверкой* правильность положения объекта контролируется точными средствами (индикатором, микроскопом и т. д.). При механической обработке выверяется параллельность технологической базы направлению подачи (рис. 4.12, а), положение оси отверстия относительно оси шпинделя станка, биение заготовки (рис. 4.12, б). К достоинству метода следует отнести высокую (0,02...0,1 мм) точность базирования, зависящую только от точности контролирующего инструмента и точности технологической базы, а к недостаткам — низкую производительность и высокие требования к квалификации рабочего.

Базирование сопряжением осуществляется при соприкосновении

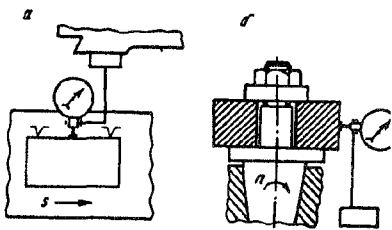


Рис. 4.12. Схемы базирования выверкой

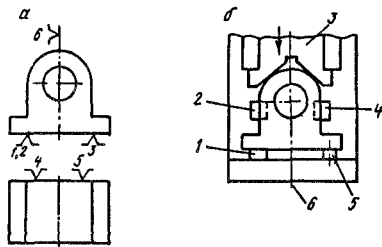


Рис. 4.13. Реализация схемы базирования (а) методом сопряжения (б): 1,5 — опоры в виде планок; 2,4 — боковые опоры; 3 — подвижная призма, реализующая скрытую базу (ось) 6

основных сборочных баз присоединяемой детали и вспомогательных баз той детали, с которой собирается рассматриваемая, или технологических баз заготовки с установочными элементами приспособления. Пример базирования сопряжением при механической обработке показан на рис. 4.13. Данный метод обеспечивает как высокую производительность, так и достаточно высокую точность базирования.

4.2. Размерная настройка

Под *размерной настройкой* будем понимать базирование формообразующих элементов режущей кромки инструмента относительно технологических баз обрабатываемой заготовки и ограничение длины рабочего хода. Если базирование заготовки осуществляется методом сопряжения, то режуще-формообразующая кромка ориентируется относительно установочных элементов приспособления (рис. 4.14).

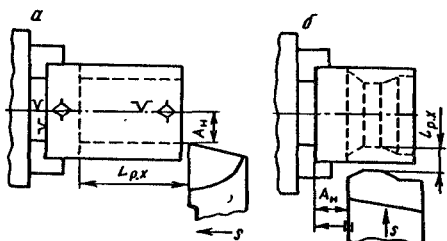


Рис. 4.14. Схемы размерной настройки при токарной обработке:

а — с продольной подачей $s_{\text{прод}}$; б — с поперечной подачей $s_{\text{поп}}$; $L_{\text{р.х}}$ — длина рабочего хода; $A_{\text{н}}$ — размер настройки

Наиболее простым методом размерной настройки является настройка по эталону (рис. 4.15). Чтобы повысить точность настройки на обработку заготовки 1 и не повредить режущую кромку инструмента 3 при его подводе к эталону 2, применяют промежуточный элемент — щуп 4 заданной толщины b . Тогда размер эталона

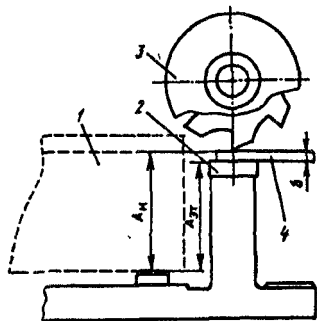


Рис. 4.15. Схема размерной настройки по эталону

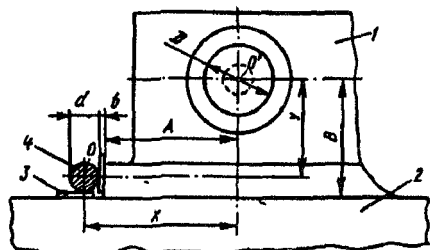
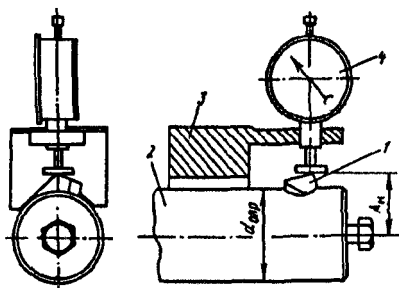


Рис. 4.16. Схема настройки на размеры A и B для растачивания отверстия на горизонтально-расточном станке

Рис. 4.17. Схема настройки резца на размер растачиваемого отверстия



(расстояние от установочного элемента) определяется так:

$$A_{эт} = A_n - b,$$

где A_n — размер настройки.

В некоторых случаях в качестве начала отсчета при размерной настройке используется технологическая база. Пример такой настройки показан на рис. 4.16. Заготовка 1 предварительно базируется и закрепляется на столе 2 . С помощью щупа 3 калиброванная оправка 4 , установленная в шпинделе станка, фиксируется в начальной позиции. Затем посредством механизмов ручной подачи стола и бабки шпинделя осуществляется перемещение на расстояния x и y для совмещения осей O и O' :

$$x = A + d/2 + b; \quad y = B - d/2 - b.$$

Отсчет перемещений осуществляется с помощью лимба или набора концевых мер с индикатором.

При размерной настройке резцов 1 в расточных борштангах применяют эталоны или приборы типа «наездник» (рис. 4.17). Прибор 3 , оснащенный индикатором 4 часового типа, настраивается предварительно по изготовленной для этой цели втулке внутренним

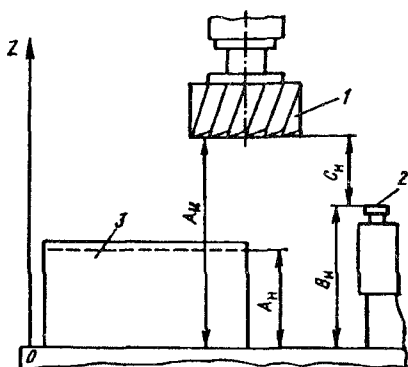


Рис 4.18 Схема размерной настройки инструментов многоцелевого станка с ЧПУ по оси Z

диаметром $d = 2 A_{и}$. Отсчет ведется от диаметра $d_{опр}$ борштанги (оправки) 2. Иногда призма прибора 3 снабжается магнитом, который при необходимости можно выключить. Такой прибор удобнее универсального измерительного инструмента. Точность установки резцов по прибору $0,005 \dots 0,015$ мм. Предварительная размерная настройка инструментов для станков с ЧПУ осуществляется вне станка с помощью оптико-механических приборов.

Некоторые станки с ЧПУ снабжены измерительными преобразователями 2 (рис. 4.18), которые позволяют выполнять размерную настройку. Для этого каждый из инструментов 1 подводится к измерительному преобразователю 2, который устанавливается на столе станка или на приспособлении высотой $B_{н}$. Система ЧПУ переводится в режим измерения. При отводе шпиндельной бабки от заготовки 3 в исходное положение системой определяется расстояние $C_{н}$, а следовательно, и расстояние $A_{и}$ от стола до инструмента. Таким образом в памяти УЧПУ формируется необходимое перемещение $z = A_{и} - A_{н}$ для выхода на размер настройки $A_{н}$.

Все описанные выше методы статической размерной настройки имеют общий недостаток — не учитывают действующие в процессе обработки силы и соответствующие им упругие деформации, вследствие которых фактический размер обработки $A_{факт}$ никогда не равен размеру настройки $A_{н}$. Последнее обстоятельство во многих случаях имеет существенное значение. Поэтому статическая настройка дополняется динамической, при которой регулирование положения инструментов и упоров, ограничивающих длину рабочего хода, осуществляется на основании результатов замера первых обработанных заготовок. Во многих случаях сразу осуществляется динамическая размерная настройка без статической.

Различают два вида динамической размерной настройки: единичную, когда процедура настройки повторяется при обработке каждой заготовки, и настройку на партию, когда настроенным на размер инструментом обрабатывается партия заготовок, соответствующая периоду его стойкости. *Единичная динамическая размерная*

настройка осуществляется методами «пробных стружек» и «пробных проходов». Пример использования первого метода, реализуемого на токарном станке, показан на рис. 4.19.

После включения вращения шпинделя вершина резца переводится из исходного положения (точка O) до касания с заготовкой (в точке 1). Затем резец отводится вправо (в точку 2), лимб поперечной подачи устанавливается на нуль и осуществляется переход в точку 3 поперечной подачей на $(D - d_1)/2$. Значение d_1 выбирается согласно неравенству $d_1 > d$, где d — требуемый размер детали. Включается продольная подача, заготовка протачивается на небольшой длине L_1 (переход в точку 4), и резец ускоренно отводится вправо (в точку 5 , которая может совпадать с точкой 3). Вращение шпинделя прекращается, и осуществляется измерение полученного диаметра d_1 . Снова включается шпиндель, вершина резца перемещается в точку 6 на расстояние $(d_1 - d)/2$, и заготовка обрабатывается на полную длину L .

Недостаток данного метода — относительно низкая точность. Кроме того, на участке длиной L_1 получается уменьшенный окончательный размер, так как этот участок обрабатывается с меньшей глубиной резания, чем остальная заготовка.

Метод «пробных проходов» отличается от метода «пробных стружек» тем, что предварительно обрабатывается не малый участок заготовки, а вся заготовка. Далее, после отвода в точку 5 , проводят коррекцию размерной настройки (перевод в точку 6) и повторную обработку на всей длине. Последнюю процедуру можно повторять несколько раз, пока не будет достигнут заданный размер. Этот метод обеспечивает высокую точность, ограничиваемую только точностью измерения, точностью регулировки (по лимбу винта подачи или по индикатору часового типа) и минимальной глубиной резания, с которой может работать данный инструмент. Однако при обработке методом «пробных проходов» существенно теряется производительность.

При динамической размерной настройке на партию деталей необходимо обеспечить не только заданную точность, но и максимальную долговечность работы инструмента между коррекциями

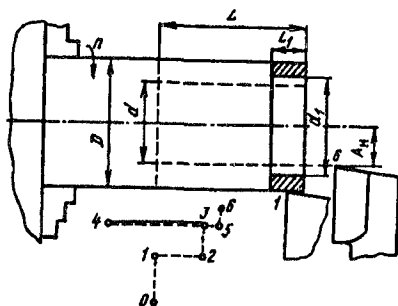


Рис. 4.19 Схема размерной настройки методом «пробных стружек»

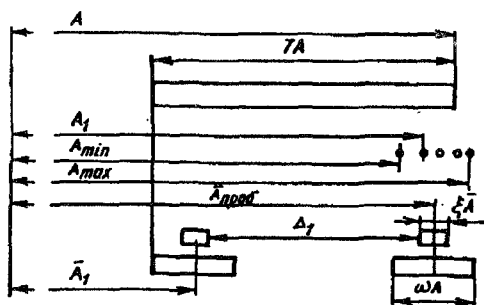


Рис. 4.20. Схема определения и смещения мгновенного поля рассеяния при размерной настройке на партию

1) индивидуальная настройка по первой заготовке; 2) обработка пробной партии из $m = 5 \dots 10$ заготовок; 3) анализ результатов измерения деталей пробной партии и первая коррекция размерной настройки с целью так расположить в пределах поля допуска TA мгновенное поле рассеяния ωA размера A , чтобы получить максимальный запас h_n на изнашивание инструмента. На рис. 4.20 приведена схема выполнения процедур размерной настройки на партию. После первой индивидуальной размерной настройки получен размер A_1 , а размеры после обработки m заготовок пробной партии распределены в пределах от A_{\min} до A_{\max} . Тогда средний настраиваемый размер в пробной партии

$$\bar{A}_{\text{проб}} = \left(\sum_{i=1}^m A_i \right) / m,$$

а мгновенное поле рассеяния определяется выражением

$$\omega A = K (A_{\max} - A_{\min}),$$

где K зависит от числа заготовок в пробной партии. С вероятностью 95% можно утверждать, что K зависит от m следующим образом:

m , шт....	5	6	7	8	9	10
K	1,408	1,296	1,215	1,152	1,104	1,066

Доверительный интервал для оценки $A_{\text{проб}}$ определяется выражением

$$\xi \bar{A} = K_1 \omega A / \sqrt{m'}, \quad (4.1)$$

где с вероятностью 95% K_1 зависит от m' следующим образом:

размерной настройки, которые выполняются несколько раз за период его стойкости. Основной причиной, вызывающей необходимость этой коррекции, является износ инструмента, из-за которого размер обработки может систематически увеличиваться (для наружной поверхности) или уменьшаться (для внутренней).

Размерная настройка осуществляется в три этапа:

m' , шт....	5	6	7	8	9	10
K_1	1,789	1,590	1,434	1,331	1,252	1,191

В соответствии со схемой, приведенной на рис. 4.20, необходимая коррекция Δ_1 , при условии, что по мере изнашивания инструмента размер обработки увеличивается, определяется следующим образом:

$$\Delta_1 = \bar{A}_{\text{проб}} - A + TA - 0,5 \omega A - \xi \bar{A}.$$

Полученный уровень настройки характеризуется параметром A_1 , т. е. средним значением размера A в партии из m заготовок, обработанных сразу после осуществления первой коррекции. Относительная точность размерной настройки на партию характеризуется показателем уровня настройки K_H :

$$K_H = (\bar{A}_{1\text{зд}} - \bar{A}_1) / TA,$$

а $A_{1\text{зд}}$ — заданный размер настройки.

По мере изнашивания инструмента уровень настройки будет смещаться от \bar{A}_1 до предельного значения $\bar{A}_{\text{пред}}$ (рис. 4.21). С учетом допуска T_H на размерную настройку запас h_H допуска TA , идущий на покрытие износа инструмента, определяется следующим выражением:

$$h_H = TA - T_H - \omega A - \xi \bar{A}. \quad (4.2)$$

При увеличении допуска T_H на размерную настройку затраты времени τ_H на промежуточные коррекции будут, как показали эксперименты, сокращаться в соответствии с выражением

$$\tau_H = B_0 T_H^{-b},$$

где B_0 — коэффициент; $b = 0,65 \dots 0,75$. Однако при этом увеличение T_H ведет к уменьшению запаса на компенсацию износа h_H инструмента. Следовательно, придется чаще выполнять промежуточные коррекции. Очевидно, что существует оптимальная точность размерной настройки, при которой суммарное время $\tau_{\text{сум}}$ на промежуточные коррекции будет минимальным.

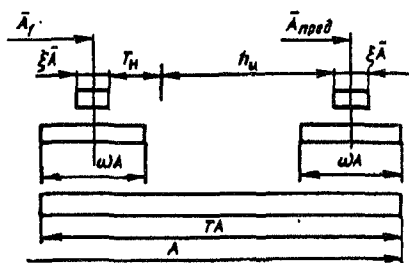


Рис. 4.21. Схема смещения мгновенного поля рассеяния при износе инструмента

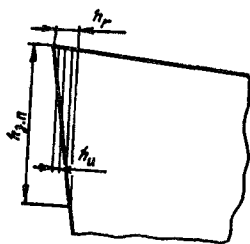


Рис. 4.22. Схема износа инструмента ($h_{э,п}$ — износ инструмента по задней поверхности, соответствующий его допустимому радиальному износу h_r)

Оценочная функция затрат в данном случае имеет вид

$$\tau_{\text{сум}} = N_{\text{н}} B_0 T_{\text{н}}^{-b}, \quad (4.3)$$

где $N_{\text{н}}$ — число возможных промежуточных коррекций, которое в соответствии со схемой, приведенной на рис. 4.22, вычисляется по формуле

$$N_{\text{н}} = h_r / h_{\text{н}}, \quad (4.4)$$

где h_r — допустимый радиальный износ инструмента.

Подставив в равенство (4.3) значения $N_{\text{н}}$ из (4.4) и $h_{\text{н}}$ из (4.2), получим

$$\tau_{\text{сум}} = B_0 h_r T_{\text{н}}^{-b} / (TA - \omega A - \xi \bar{A} - T_{\text{н}}).$$

Приравняв нулю производную от $\tau_{\text{сум}}$ по $T_{\text{н}}$, получим

$$T_{\text{н.опт}} = b (TA - \omega A - \xi \bar{A}) / (1 + b). \quad (4.5)$$

Для средних значений $b = 0,7$, согласно выражению (4.5), оптимальная точность размерной настройки $T_{\text{н.опт}}$ составляет около 40% максимального запаса допуска на износ инструмента.

4.3. Размерные цепи при сборке и механической обработке

Размерные связи между исполнительными поверхностями машины и ее механизмов образуются с помощью размеров, принадлежащих сборочным единицам и деталям, которые сопрягаются по основным и вспомогательным базам. То же можно сказать об относительных поворотах. На рис. 4.23 показана схема формирования расстояния A_{Δ} между осью шпинделя силовой головки 1 и установочной поверхностью приспособления 2. Это расстояние формируется с помощью размеров $A_1 \dots A_4$. Аналогично формируется параллельность оси шпинделя силовой головки 3 по отношению к другой установочной поверхности приспособления (α_{Δ} зависит от углов $\alpha_1 \dots \alpha_5$).

В общем случае расположенные последовательно по замкнутому контуру размеры (относительные повороты) принято называть *размерной цепью*. Под *сборочной размерной цепью* понимают замкнутую последовательность векторов, выражающих размеры сопрягаемых деталей (сборочных единиц), входящих в состав проектируемой (или проверяемой размерным расчетом) машины (сборочной единицы) и оказывающих влияние на ее функционирование.

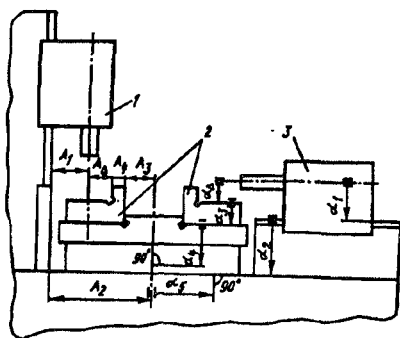


Рис. 4.23. Схема размерных связей агрегатного станка

Сборочная размерная цепь состоит из составляющих звеньев и замыкающего (исходного) звена. *Составляющие звенья* размерной цепи — это размеры (относительные повороты), принадлежащие элементам машины (сборочной единицы). *Замыкающее звено* — это размер (угол относительного поворота), который принадлежит не элементу машины (сборочной единицы), а машине (сборочной единице) в целом. Этот размер (угол относительного поворота) является основной геометрической характеристикой машины (сборочной единицы), позволяющей оценивать точность и надежность ее функционирования. Сказанное относится к параметрам A_{Δ} и α_{Δ} на рис. 4.23.

Любая размерная цепь расстояний может быть отнесена к одному из следующих видов: линейные, плоские и пространственные. У *линейной размерной цепи* все звенья выражены в линейных единицах и параллельны. У *плоской размерной цепи* одно или несколько составляющих звеньев не параллельны замыкающему звену. Звенья *пространственной размерной цепи* расположены в пространстве. Но путем проецирования на координатные оси можно плоскую размерную цепь привести к одной или двум линейным, а пространственную — к нескольким связанным между собой плоским. Рассмотренные размерные цепи (расстояний) показаны на рис. 4.24. Уравнение линейной цепи с учетом направлений векторов A_i в данном случае имеет вид

$$A_{\Delta} = A_1 + A_2 + A_3 - A_4.$$

Обход контура при построении размерной цепи лучше начинать с замыкающего звена, выбирая его направление противоположным

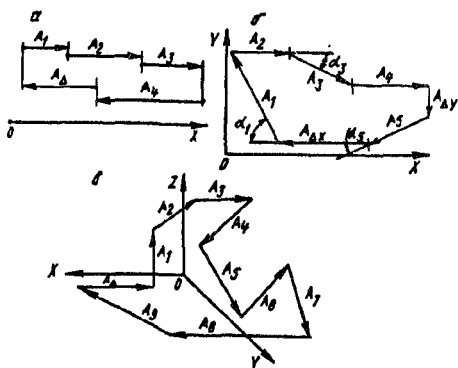


Рис. 4.24. Схемы линейной (а), плоской (б) и пространственной (в) размерных цепей (расстояний)

Уравнения плоской размерной цепи, показанной на рис. 4.24, б, имеют вид:

$$A_{\Delta x} = A_1 \cos \alpha_1 + A_2 + A_3 \cos \alpha_3 + A_4 - A \cos \alpha_5 ;$$

$$A_{\Delta y} = A_1 \sin \alpha_1 - A_3 \sin \alpha_3 - A_5 \sin \alpha_5 .$$

Эти уравнения не являются линейными, и максимальные значения полей рассеяния зависят не только от погрешностей линейных звеньев, но и от погрешности углов.

Линейная цепь относительных поворотов, показанная на рис. 4.25, связывает между собой отклонения от параллельности. Поскольку эти параметры характеризуются соответствующими полями рассеяния, то уравнение размерной цепи можно записать по аналогии с уравнением (4.6).

Вероятность появления максимального (или минимального) отклонения замыкающего звена очень мала, так как это возможно лишь при условии, что все составляющие звенья одновременно

примут соответствующие крайние значения. Например, вероятность того, что в сборочной единице из пяти деталей размеры всех примут крайние (в пределах 5% поля допуска) значения, будет равна 0,0000003.

Из математической статистики известно,

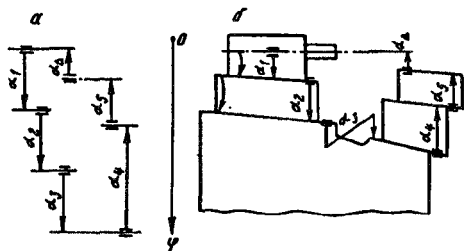


Рис. 4.25. Схема линейной цепи относительных поворотов (а) и соответствующая ей схема сборочной единицы машины (б)

что при заданной доверительной вероятности P поле рассеяния случайной величины (в нашем случае погрешность звена размерной цепи ω_i) связано со стандартным отклонением σ_i , а следовательно, и с дисперсией D_i , следующим равенством: $\omega_i = \lambda_i \sigma_i$, где λ_i — коэффициент, зависящий от закона распределения; $\sigma_i^2 = D_i$. С другой стороны, если некоторая случайная величина является суммой других случайных величин, то дисперсия суммы равна сумме дисперсий. На этом основании можно записать для линейной размерной цепи:

$$\omega_{\Delta} = \lambda_{\Delta} \sqrt{\sum_{i=1}^{n-1} (\omega_i / \lambda_i)^2}. \quad (4.7)$$

Конструкторские размерные цепи применяются при проектировании машин и технологической оснастки к металлообрабатывающему оборудованию. Технологические размерные цепи связывают размеры обрабатываемой заготовки на разных стадиях технологического процесса и размеры готовой детали. Пример формирования технологической размерной цепи приведен на рис. 4.26. На этом рисунке показаны: заготовка (б), готовая деталь (а) с размерами, параллельными оси Y , операционные эскизы со схемой базирования и размерная цепь, включающая размеры заготовки (3), детали (А) и технологические (операционные) размеры (С). На первой операции выполняются сверление и зенкерование фаски, затем после термической обработки (операция 2) последовательно шлифуют основание (операция 3) и верхнюю плоскость (операция 4) заготовки. Технологические размеры откладываются только от соответствующей базы. Замыкающим звеном в данном случае является размер A_2 , а уравнение размерной цепи имеет вид (обход цепи начинается с точки m)

$$-C_2 + C_3 - A_2 - C_1 + 3 = 0$$

или

$$A_2 = 3 + C_3 - C_1 - C_2.$$

Уравнение для определения максимального поля рассеяния замыкающего звена имеет вид

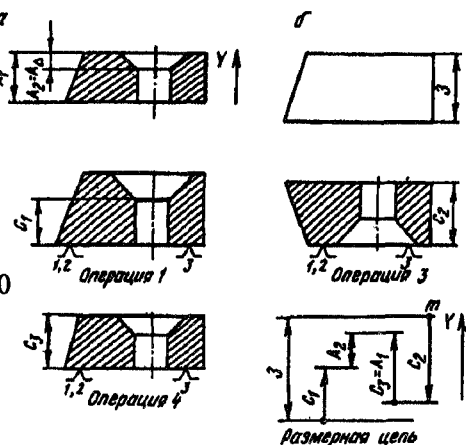


Рис. 4.26. Формирование технологической размерной цепи

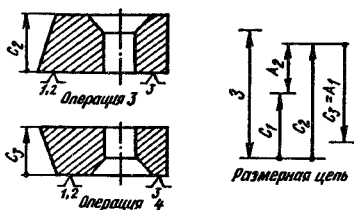


Рис. 4.27. Схема сокращения числа звеньев технологической размерной цепи

вирования поверхностей (рис. 4.27). В данном случае размеры Z и C_3 не входят в размерную цепь и $\omega A_2 = \omega C_1 + \omega C_2$.

В технологии машиностроения используются следующие методы обеспечения заданной точности замыкающего звена размерной цепи: 1) метод полной взаимозаменяемости; 2) метод неполной (частичной) взаимозаменяемости; 3) методы технологической компенсации; 4) методы конструкторской компенсации (имеются в виду методы компенсации погрешностей составляющих звеньев размерной цепи). Выбор того или иного метода обусловлен требованиями к точности замыкающего звена, особенностями конструкции сборочной единицы (машины), технологией сборки и механической обработки, типом производства. Критерий выбора — минимизация суммарных затрат на изготовление деталей и сборку машины.

При сборке *методом полной взаимозаменяемости* детали, входящие в комплект сборочной единицы, отбираются из соответствующих совокупностей случайным образом. Замена в комплекте детали данного наименования любой другой того же наименования не должна приводить к выходу замыкающего звена за пределы допуска. Чтобы такое было возможно, необходимо выполнять следующее неравенство:

$$\omega_{\Delta} > \sum_{i=1}^{n-1} \omega_i.$$

Если в пределе считать, что максимальное поле рассеяния равно полю допуска, то для линейной цепи

$$TA_{\Delta} > \sum_{i=1}^{n-1} TA_i. \quad (4.8)$$

Недостатком данного метода является необходимость высокой точности обработки деталей (формула (4.8)) по тем размерам, которые являются составляющими звеньями размерной цепи. Это

$$\omega A_2 = \omega Z + \omega C_3 + \omega C_1 + \omega C_2.$$

Высокой точности замыкающего звена в данном случае достигнуть нельзя, так как ωA_2 зависит от погрешности заготовки и суммы погрешностей технологических размеров.

Повысить точность замыкающего звена технологической цепи можно, сократив число ее звеньев. Для этого следует поменять порядок шлифования

требование ужесточается при увеличении числа звеньев размерной цепи. Поэтому метод полной взаимозаменяемости применяется в массовом производстве при сборке изделий средней точности.

При механической обработке метод полной взаимозаменяемости имеет смысл в том случае, когда требуемый размер обработки обеспечивается за счет формообразующего размера режущего инструмента, например сверл, зенкеров, разверток, протяжек, дисковых фрез и т. д.

Комплектование деталей для сборки *методом неполной взаимозаменяемости* осуществляется так же, как при использовании метода полной взаимозаменяемости. Однако поскольку вероятность максимального отклонения размера замыкающего звена мала, то ограничивающее неравенство следует получать на основании выражения (4.7) с учетом допустимого процента риска сборки единиц, в которых размер замыкающего звена вышел за пределы допуска:

$$TA > t(\alpha) \sqrt{\sum_{i=1}^{n-1} TA_i^2 / \lambda_i^2}, \quad (4.9)$$

где $t(\alpha)$ зависит от допустимого процента риска следующим образом:

$\alpha, \% \dots\dots$	0,1	0,27	1	2	3	4
$t(\alpha) \dots\dots\dots$	3,290	3,0	2,576	2,326	2,170	2,054

а λ_i — статистические коэффициенты, зависящие от закона распределения погрешности i -го звена; для закона нормального распределения $\lambda_i^2 = 9$, для закона равной вероятности $\lambda_i^2 = 3$.

Неравенство (4.9) можно использовать, если $n \geq 4$ (погрешности составляющих звеньев распределены по нормальному закону) или $n \geq 7$ (погрешности составляющих звеньев распределены по закону, близкому к равной вероятности). Это неравенство показывает, что использование метода неполной взаимозаменяемости позволяет расширять поле допусков на составляющие звенья по сравнению с требованиями метода полной взаимозаменяемости.

Методы технологической компенсации включают: метод групповой взаимозаменяемости, метод подбора и метод пригонки.

В случаях сборки *методом групповой взаимозаменяемости* детали перед комплектованием в сборочную единицу сортируют на группы по размерам, а само комплектование проводят в соответствии с определенным правилом. Чаще всего номера комплектов совпадают с номерами групп размеров. Это обычное, но не обязательное правило. Метод применяется в условиях массового производства, но когда невозможно технически и технологически обеспечить условия полной (4.7) и неполной (4.9) взаимозаменяемости. Он дает

возможность существенно расширить допуски на составляющие звенья и таким образом значительно снизить затраты на изготовление деталей. Однако при этом эффективность метода несколько снижается в связи с необходимостью ужесточать требования к точности формы сопрягаемых поверхностей и вместо уровня А (нормальная геометрическая точность) использовать уровень В или С (повышенной или высокой геометрической точности). В первом случае (уровень А) погрешность формы может составлять 30% допуска на размер, а при уровнях В и С — соответственно 20 и 12%.

Кроме того, использование метода групповой взаимозаменяемости ведет к существенному увеличению незавершенного производства. Причиной этого являются погрешности уровня настройки и неодинаковость параметров закона распределения размеров деталей разных наименований, приводящие к образованию совокупности деталей, из которых невозможно составить комплект. Количество комплектов будет соответствовать минимальному количеству деталей данного наименования, попавших при сортировке в данную группу. С учетом незавершенного производства приходится регулировать уровень размерной настройки.

Рассмотрим задачу сортировки деталей для случая трехзвенной размерной цепи. Это наиболее распространенный случай, когда необходимо обеспечить заданную посадку в соединении (рис. 4.28, а), где A — размер отверстия, B — размер вала, TA и TB — соответственно допуски на эти размеры. Для решения задачи нужно определить количество N групп, на которые будут разбиты допуски TA и TB , чтобы при сборке деталей с одинаковыми номерами групп был обеспечен средний зазор (натяг) \bar{z} с допуском $Tz = z_{\max} - z_{\min}$. Кроме того, необходимо определить номинальный (наибольший) размер вала. В соответствии со схемой, приведенной на рис. 4.28, б, построена размерная цепь (рис. 4.29, а), уравнение которой имеет вид

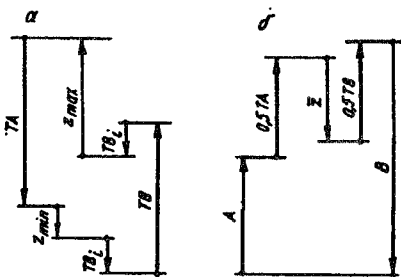
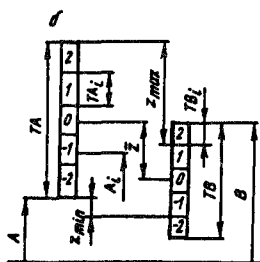
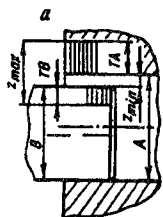


Рис. 4.28. Схемы соединения «вал — втулка» (а) и разбивки допусков размеров вала и отверстия на группы (б)

Рис. 4.29. Размерные цепи для решения задачи сортировки

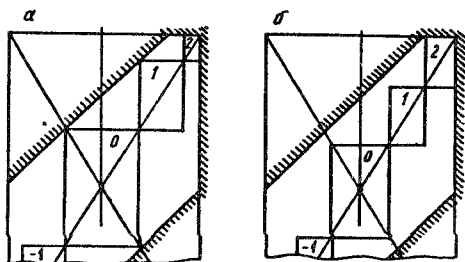


Рис. 4.31. Варианты построения прямоугольников групповых допусков

динение с заданными характеристиками. Если точка E находится вне указанного многоугольника, то данная пара не позволяет получить заданное соединение.

Следовательно, внутри многоугольника $cdemnk$ можно расположить связанные прямоугольники групповых допусков, подобные основному прямоугольнику допусков. Для этого в нем проводим две диагонали. Начинать построение можно от центра или от верхней (нижней) части em (kc) многоугольника $cdemnk$. В первом случае строим на диагоналях прямоугольник, который касается границ допустимой области, и получаем значения TA_0 и TB_0 . Затем продолжаем вертикальные стороны полученного прямоугольника до встречи с границами допустимой области. Из точек встречи проводим горизонтальные линии до пересечения с диагональю cm и получаем таким образом значения групповых допусков $TB_{-1} = TB_1$ и $TA_{-1} = TA_1$. Аналогично проводим построение остальных прямоугольников групповых допусков.

Если начать построение прямоугольников групповых допусков от центра h , то возможны ситуации, показанные на рис. 4.31, а, т. е. групповые допуски TB_2 и TA_2 получаются излишне жесткими. В таких случаях лучше начинать построение от верхней и нижней частей многоугольника $cdemnk$ (рис. 4.31, б). При этом не обязательно, чтобы прямоугольники групповых допусков касались границ допустимой области. Преимущество графического метода определения групповых допусков состоит в том, что он позволяет в определенных случаях уменьшить необходимое число групп размеров. Так, например, изображенный на рис. 4.31 случай соответствует следующим исходным данным: $TA = 0,08$ мм, $TB = 0,06$ мм, $Tz = 0,04$ мм. Тогда, согласно выражению (4.10), $N = 6$, а графический метод показал, что достаточно пяти групп.

Если число звеньев размерной цепи больше трех, то задача сортировки и комплектования усложняется и не имеет единственного рационального решения.

Метод подбора заключается в том, что детали, подаваемые на

сборку партиями, изготовлены с экономически и технически приемлемой точностью, при которой

$$TA_{\Delta} < \sum_{j=1}^{n-1} TA_j.$$

В таком случае сборщик, согласно измеренным значениям размеров, подбирает детали так, чтобы

$$TA_{\Delta} > \sum_{j=1}^{n-1} \Delta_j,$$

где Δ_j — реальное отклонение размера j -й детали. Однако в таком случае могут остаться детали, из которых невозможно будет подобрать комплект.

Для повышения эффективности данного метода выделяется специально предусмотренная конструктором компенсационная деталь размером $A_{\text{комп}}$, необходимый разброс которого $\Delta A_{\text{комп}}$ можно найти на основании анализа соответствующей цепи:

$$\Delta A_{\text{комп}} = TA_{\Delta} + \sum_{j=1}^{n-2} TA_j.$$

Компенсационная деталь обычно проще всех остальных, и ее легче выполнить с достаточно высокой точностью. Сборщик сначала производит предварительную сборку со взятой наугад или эталонной компенсационной деталью, измеряет фактический размер замыкающего звена A_{Δ} . По результатам замера подбирается компенсационная деталь с нужным размером $A_{\text{комп}}$, который обеспечивает требования к точности замыкающего звена.

Метод пригонки применяется в условиях серийного и мелкосерийного производства при высоких требованиях к точности замыкающего звена. В данном случае компенсационная деталь после предварительной сборки и измерения фактического размера замыкающего звена обрабатывается на станке или опиливается так, чтобы получить заданную точность замыкающего звена. Технологический размер компенсационной детали $A_{\text{комп.т}}$ определяется из выражения

$$A_{\text{комп.т}} = A_{\text{комп.мах}} + TA_{\text{комп.т}}$$

Максимальный припуск, который может быть удален с компенсационной детали, $P_{\text{мах}} = \Delta A_{\text{комп}} + TA_{\text{комп.т}}$.

На рис. 4.32 дана классификация конструкторских компенсаторов, где выделены следующие признаки классификации: назначение, характер компенсируемых параметров, конструктивное исполнение.

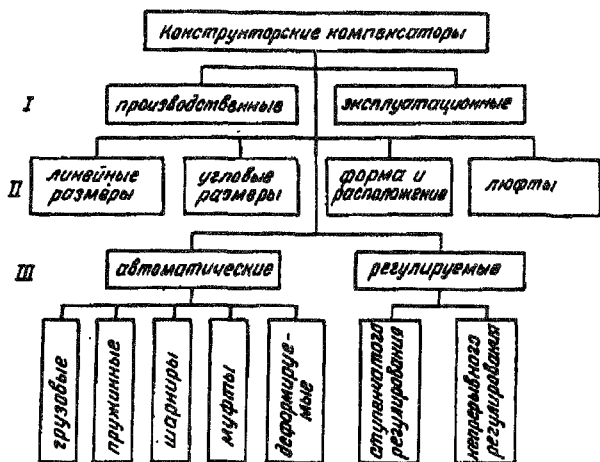


Рис. 4.32. Классификация конструкторских компенсаторов:
 I — по назначению; II — по характеру компенсируемых параметров; III — по конструкции

Конструкторским компенсатором называется одна из штатных деталей сборочной единицы, допускающая изменение (регулирование) ее составляющего или структурного размера в процессе сборки либо в процессе эксплуатации машины для достижения заданной (обычно высокой) точности замыкающего звена. Рационально встроенный в сборочную единицу конструкторский компенсатор может способствовать повышению надежности машины, так как позволяет поддерживать в процессе эксплуатации необходимую точность замыкающего звена.

Применение конструкторской компенсации наиболее целесообразно для уменьшения последствий влияния таких погрешностей формы и положения, как некруглость, неплоскостность, непараллельность и неперпендикулярность.

4.4. Жесткость машин и технологических систем механической обработки

В процессе эксплуатации на любую машину действуют силы, которые вызывают упругие деформации как машины в целом, так и ее элементов. Различают деформации самих деталей, из которых состоит машина, и контактные деформации на поверхностях сопряжения деталей. Деформации деталей не являются доминирующими, они только дополняют контактные, составляющие основную долю (до 85%) в общих перемещениях. Сближение контактирующих поверхностей зависит не только от приложенной силы, но и от реальной площади контакта, которая определяется погрешностью формы и микрогеометрией этих поверхностей, а также приложенной силой. Технологическая система механической обработки отличается

от обычной системы тем, что в нее, кроме технологической машины (станка), включены приспособление, инструмент и заготовка. В такой системе технолога интересует не полная упругая деформация, а только та ее часть, которая влияет на размер обрабатываемой поверхности, смещая уровень размерной настройки.

Свойство машины (и технологической системы) упруго деформироваться под действием силы будем называть *податливостью*, а обратное податливости свойство — *жесткостью*. Податливость измеряется в миллиметрах на килоньютон (мм/кН), а жесткость j — в килоньютонах на миллиметр (кН/мм). Связь между силой P и соответствующей ей упругой деформацией δ обычно нелинейна (рис. 4.33), поэтому определяющее уравнение жесткости всякой машины имеет вид

$$j = \Delta P / \Delta \delta,$$

где ΔP — приращение деформирующей силы; $\Delta \delta$ — соответствующее ему приращение упругой деформации.

Для технологической системы механической обработки определяющее уравнение жесткости записывается следующим образом:

$$j = \Delta P_y / \Delta y, \quad (4.11)$$

где ΔP_y — приращение проекции силы резания на ось Y , перпендикулярную к обработанной поверхности; Δy — соответствующее ему приращение проекции упругой деформации на ту же ось.

В качестве приближенной характеристики технологической системы используют среднюю жесткость j для диапазона изменения силы P_y от нуля до некоторого фиксированного значения P_{y1} . Тогда

$$j = P_{y1} / y_1. \quad (4.12)$$

Жесткость технологической системы существенно зависит от ее состояния и условий нагружения. Так, средняя жесткость шпиндельной бабки круглошлифовального станка после 30-минутного разогрева на холостом ходу увеличивается на 44%. Эксперименты показали, что средняя жесткость существенно зависит от координат точки приложения и направления действия силы резания. Например, на рис. 4.34 показана зависимость жесткости j токарного станка от

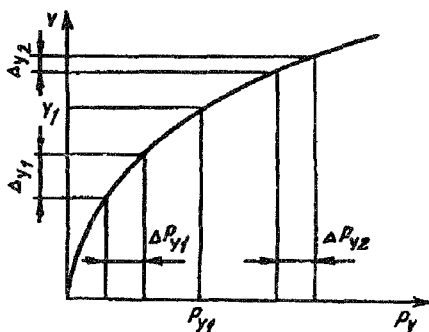


Рис. 4.33. Зависимость проекции y упругой деформации δ технологической системы от проекции силы резания

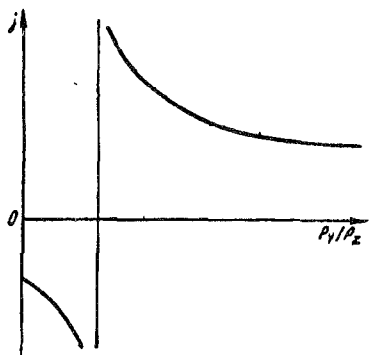


Рис. 4.34. Зависимости жесткости токарного станка от отношения проекций силы резания

отношения P_y/P_z . Объясняется это явление тем, что на упругую деформацию суппорта влияет не только составляющая P_y , но и моменты сил P_x и P_z относительно мгновенных точек поворота в вертикальной и горизонтальной плоскостях. При этом из-за изменения отношения между составляющими силы резания изменяются не только значения указанных моментов, но иногда и их знак.

При точении в центрах (рис. 4.35, а) жесткость зависит от координаты x точки обработки А (рис. 4.35, б). Характер этой зависимости (рис. 4.35, в) обуславливается относительной податливостью заготовки. Если жесткость заготовки очень велика, то жесткость технологической системы при положении точки А между центрами будет большей, чем в зоне передней или задней бабки (показано штриховой линией). Изменение жесткости, показанное сплошной линией, соответствует случаю, когда жесткость заготовки мала по сравнению с жесткостью передней и задней бабок.

Очень часто при обработке сила резания периодически изменяется либо из-за изменения глубины t резания (рис. 4.36), либо вследствие прерывности процесса резания (строгание, долбление, фрезерование) или обрабатываемой поверхности. В первом приближении можно принять, что сила резания изменяется либо гармонически, либо в виде прямоугольных импульсов.

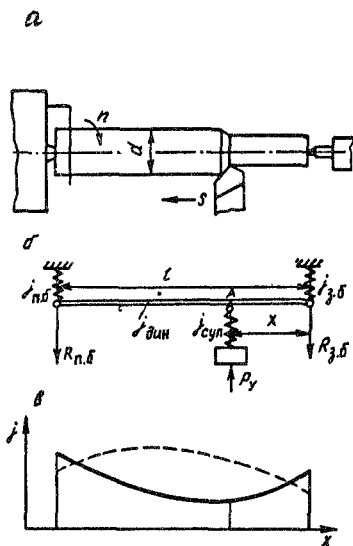


Рис. 4.35. Схема изменения жесткости при точении в центрах ($j_{п.б}$, $j_{суп}$ и $j_{з.б}$ — жесткости соответственно передней бабки, суппорта и задней бабки; $R_{п.б}$ и $R_{з.б}$ — реакции опор заготовки в передней и задней бабках)

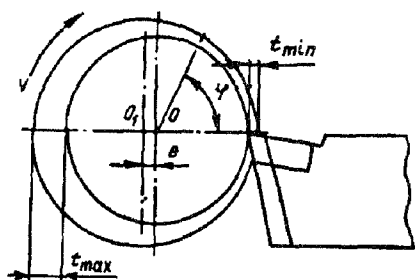


Рис. 4.36. Схема изменения глубины резания при точении заготовки, ось вращения O которой не совпадает с ее геометрической осью O_1 (e — смещение осей, φ — угол поворота)

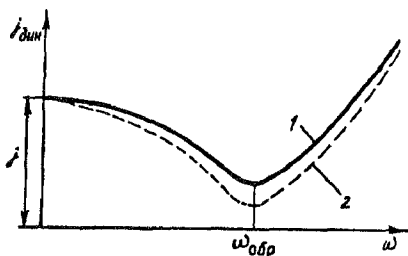


Рис. 4.37. Зависимость динамической жесткости системы с одной степенью свободы от частоты возмущающей силы

Полагая, что в определяющем уравнении (4.11) $\Delta P_y = A_p$, а $\Delta y = A_{\text{упр}}$, где A_p — амплитуда силы P_y , а $A_{\text{упр}}$ — амплитуда упругой деформации, можно ввести понятие «динамическая жесткость»:

$$j_{\text{дин}} = A_p / A_{\text{упр}}. \quad (4.13)$$

Динамическая жесткость характеризует поведение технологической системы при ее нагружении периодической силой. Определяющее уравнение (4.13) можно применять и для случая, когда характер изменения силы резания имеет вид прямоугольных импульсов. Зависимость динамической жесткости от частоты ω возмущающей силы для системы с одной степенью свободы показана на рис. 4.37, где линия 1 относится к системе с большим, а линия 2 — к системе с меньшим демпфированием. Минимальная жесткость соответствует совпадению частоты возмущения с собственной частотой колебаний системы $\omega_{\text{обр}}$. При $\omega \rightarrow 0$ динамическая жесткость становится равной статической жесткости j .

Динамическая $j_{\text{дин}}$ и статическая j жесткости связаны коэффициентом динамичности $K_{\text{дин}}$:

$$K_{\text{дин}} = j / j_{\text{дин}}.$$

Чем больше коэффициент $K_{\text{дин}}$, тем больше амплитуда упругой деформации при одинаковой амплитуде силы резания.

Обычно технологическая система имеет несколько степеней свободы и соответственно несколько собственных частот колебаний. Например, случай токарной обработки очень жесткой заготовки в патроне можно привести к системе с двумя степенями свободы.

Коэффициент динамичности системы в данном случае определяется по формуле

$$K_{\text{дин}} = (K_{\text{дин}1}j_2 + K_{\text{дин}2}j_1)/(j_1 + j_2),$$

где индекс 1 относится к заготовке, а индекс 2 — к патрону. Анализ этого выражения показывает, что для уменьшения коэффициента динамичности технологической системы без изменения ее общей жесткости необходимо увеличить статическую жесткость того элемента, у которого $K_{\text{дин}}$ больше, и уменьшать у того, у которого он меньше.

Жесткость технологических систем механической обработки и их элементов регламентируется для оценки их качества. Она обычно определяется экспериментально. Наиболее объективные результаты дают методы определения жесткости, которые в качестве источника деформирующей силы используют процесс резания. Такие методы называют производственными. Некоторые из них основаны на использовании элемента с известной жесткостью.

Производственный метод определения жесткости токарного станка (рис. 4.38) осуществляется в три этапа. На первом этапе за 5...7 проходов без изменения размера настройки A_n обрабатывается участок заготовки, после чего можно считать, что $A_n = d_n/2$. На втором этапе без изменения размера настройки обрабатывается оставшаяся часть заготовки. На последнем этапе с помощью индикаторного устройства в нескольких сечениях с разными вылетами L_i измеряются отклонения Δ_i радиуса $d_i/2$ от A_n . Причиной этих отклонений является упругая деформация технологической системы, т. е. в любом сечении $\Delta_i = y_i$. Эта деформация складывается из деформации станка $y_{\text{ст}}$ и обрабатываемого образца $y_{\text{обр } i}$, податливость которого, как известно из курса «Сопrotивление материалов», пропорциональна вылету обработки L_i в кубе. Для любого сечения можно записать:

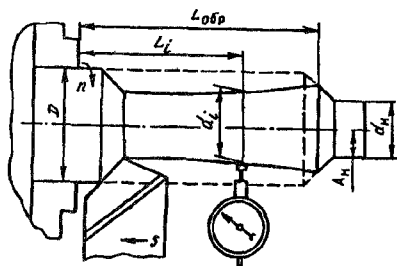


Рис. 4.38. Схема производственного метода определения жесткости токарного станка (система «передняя бабка — суппорт»)

$$y_i = \Delta_i = P_y(p_{\text{ст}} + p_{\text{обр } i}),$$

где $p_{\text{ст}}$ — податливость станка; $p_{\text{обр } i}$ — податливость обрабатываемого образца в i -м сечении. Отсюда с учетом известной зависимости податливости образца от его вылета и на основании того, что податливость системы из последовательно соединен-

ных элементов равна сумме податливостей этих элементов, получаем

$$j = \frac{29,59D^4}{L_{обр}^3} \frac{1 - K_{di}}{K_{di} - \lambda_i^3}, \quad (4.14)$$

где $K_{di} = \Delta_i/\Delta_{обр\ i}$; $\lambda_i = L_i/L_{обр}$.

Для повышения точности оценки жесткости и компенсации погрешности измерения Δ_i необходимо, согласно выражению (4.14), вычислить $j_{ст}$ для нескольких сечений (значений λ_i) и затем определить среднее значение.

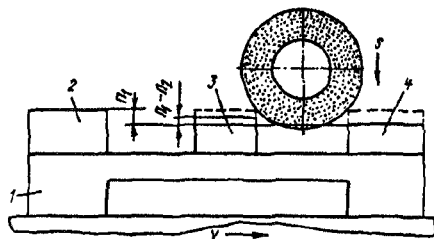


Рис. 4.39. Схема производственного метода определения жесткости плоскошлифовального станка

Рассмотренный метод позволяет определять и динамическую жесткость. Для этого образец закрепляют через эксцентричную разрезную втулку с заданным значением эксцентриситета $e_{обр}$. После обтачивания замеряется эксцентриситет e_i в нескольких сечениях.

Полученные данные позволяют вычислять динамическую жесткость.

Для определения жесткости плоскошлифовального станка можно использовать двухопорную балку 1, на которой закреплены три образца 2...4 (рис. 4.39). На первом этапе путем длительного выхаживания добиваются, чтобы шлифованные поверхности образцов находились в одной плоскости. Затем, после выполнения вертикальной подачи круга s , осуществляется один проход, во время которого шлифуются только образцы 3 и 4. При шлифовании образца 4 податливость системы равна податливости станка $p_{ст}$, а при шлифовании образца 3 — сумме податливостей станка и балки (p_1).

И в данном случае легко получаем выражение для вычисления жесткости станка $j_{ст}$, если известны жесткость балки j_1 и припуски P_1 и P_2 , снятые соответственно с образцов 4 и 3:

$$j_{ст} = j_1 s (P_1 - P_2) / ((S - P_1) P_2).$$

Более точные результаты оценки жесткости получаются, если есть возможность в процессе обработки измерять силу резания и упругую деформацию.

4.5. Погрешности сборки и механической обработки

Погрешности, возникающие при сборке и механической обработке, проявляются как систематические или случайные величины. Источником систематических погрешностей является опре-

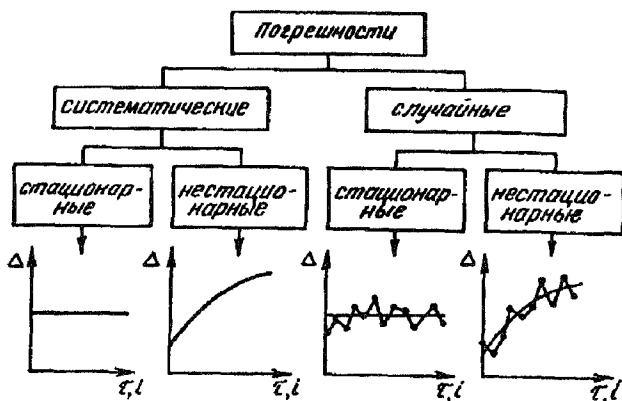


Рис. 4.40. Классификация погрешностей по проявлению (Δ — погрешность; τ — время; i — номер заготовки)

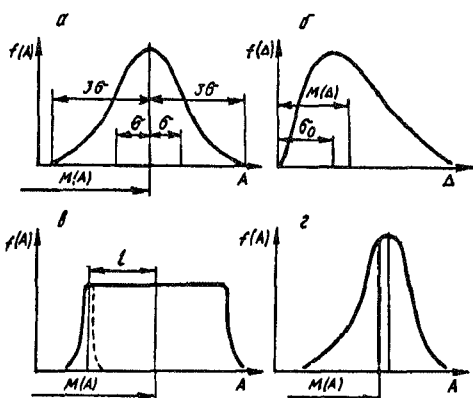
деленная причина или процесс, знание которых позволяет прогнозировать уровень погрешности в любой момент времени протекания технологического процесса. Случайные погрешности возникают в результате действия большого количества не связанных между собой факторов. Прогнозировать уровень случайной погрешности для конкретной сборочной единицы или обработанной детали невозможно. Причинная связь между случайной погрешностью и вызывающими ее факторами иногда бывает известной (явной), а иногда — не вполне выясненной.

В зависимости от характера влияния времени τ протекания технологического процесса (или порядкового номера i обрабатываемой заготовки) погрешности проявляются как *стационарные* или *нестационарные* (рис. 4.40). Средний уровень и размах стационарной погрешности не зависят от времени, а у нестационарной может изменяться либо средний уровень, как это показано на рис. 4.40, либо, для случайной погрешности, размах, либо и средний уровень и размах.

Наиболее полно случайная погрешность характеризуется законом распределения (его параметрами). Установлено, что погрешности размеров подчиняются нормальному закону распределения (рис. 4.41, а), который имеет место, когда случайная величина зависит от действия большого числа различных факторов, причем интенсивность влияния всех факторов примерно одинакова. Нормальному закону, кроме размеров деталей, обработанных на настроенных станках, подчиняются и масса заготовок, погрешности измерений, твердость заготовок и т. д.

Параметры нормального закона: математическое ожидание $M(A)$ и стандартное отклонение σ можно оценить на основании результатов измерения размера A_i деталей выборки объемом m из партии или потока. Оценкой $M(A)$ является среднее значения \bar{A} :

Рис. 4.41. Законы распределения погрешностей обработки



$$\bar{A} = \left(\sum_{i=1}^m A_i \right) / m ,$$

а оценкой стандартного отклонения σ — величина S , определяемая из выражения

$$S^2 = \sum_{i=1}^m (A_i - \bar{A})^2 / (m - 1) ,$$

где A_i — элементы вариационного ряда размеров A .

Данные оценки являются приближенными вследствие ограниченности объема выборки. Точность оценки характеризуется доверительным интервалом, в котором с заданной доверительной вероятностью (характеристики достоверности оценки) находятся истинные значения оцениваемого параметра. При относительно небольшом объеме выборки доверительный интервал для $M(A)$ определяется следующим неравенством:

$$\bar{A} - t(P, m) S / \sqrt{m} < M(\bar{A}) < \bar{A} + t(P, m) S / \sqrt{m} ,$$

где $t(P, m)$ — критерий Стьюдента, зависящий от доверительной вероятности P и объема выборки m .

Значения критерия Стьюдента для $P = 0,95$ приведены в табл. 4.1. Доверительный интервал для стандартного отклонения определяется следующим неравенством (для $m > 15$):

$$S(1 - q) < \sigma < S(1 + q) ,$$

где q — критерий, зависящий от доверительной вероятности P и объема выборки m (табл. 4.2).

Если $m < 15$, то оценку S лучше осуществлять по размаху $R_m = A_{\max} - A_{\min}$ значений A в выборке. Тогда

$$R_m / d_{m1} < \sigma < R_m / d_{m2} ,$$

где d_{m1} , d_{m2} — критерии, зависящие от доверительной вероятности P и объема выборки m (табл. 4.3).

Табл. 4.1. Значения критерия Стьюдента при $P = 0,95$

m , шт.	t	m , шт.	t
5	2,78	18	2,11
8	2,37	20	2,09
10	2,26	25	2,06
12	2,20	30	2,05
15	2,15	40	2,02

Табл. 4.2. Значения критерия q при $P = 0,95$

m , шт.	q	m , шт.	q
15	0,46	30	0,28
17	0,42	35	0,26
20	0,37	40	0,24
25	0,32	45	0,22

Табл. 4.3. Значения критерия d_m при $P = 0,95$

m , шт.	d_{m1}	d_{m2}	m , шт.	d_{m1}	d_{m2}
4	3,98	0,59	10	4,79	1,67
6	4,36	1,06	11	4,86	1,78
8	4,61	1,41	12	4,92	1,88
9	4,70	1,55			

Погрешности относительного положения и погрешности формы поверхностей подчиняются закону Рэлея (рис. 4.41, б). Эти погрешности являются положительными величинами и изменяются от нуля до определенного значения. Закон Рэлея однопараметрический. Стандартное отклонение погрешности Δ (σ) связано с параметром закона распределения σ_0 зависимостью $\sigma = 0,655 \sigma_0$, а математическое ожидание погрешности Δ — зависимостью $M(\Delta) = 1,253 \sigma_0$.

Для распределения Рэля экспериментальная оценка математического ожидания и стандартного отклонения вычисляется так же, как для нормального распределения.

Если на выполняемый размер, кроме случайных причин, обуславливающих рассеяние его значений согласно нормальному распределению, действует систематическая причина, обуславливающая равномерное смещение l центра группирования размеров, то при $l/\sigma > 25$ (рис. 4.41, в) распределение этого размера будет близко к закону равной вероятности.

Если систематическая причина обуславливает неравномерное смещение центра группирования размеров, то выполняемый размер будет подчиняться несимметричному закону распределения (рис. 4.41, з), который называется обобщенным А-законом.

Поле рассеяния размеров (погрешностей) при известных параметрах закона распределения можно определить из следующих выражений: $\omega = 6\sigma$ (закон нормального распределения); $\omega = 5,252\sigma$ (закон Рэля); $\omega = 3,464\sigma$ (закон равной вероятности). Данные значения ω соответствуют доверительной вероятности $P = 0,997$.

Источниками сборочных погрешностей являются: 1) погрешности деталей, из которых собирается машина или сборочная единица; 2) силовое замыкание, необходимое для сохранения определенности базирования. Силовое замыкание вызывает не только полезные, преднамеренно создаваемые упругие деформации деталей, но и вредные, которые искажают форму, полученную деталью после механической обработки. Последние возникают из-за неравномерного распределения внутренних напряжений в деформируемой детали, вызываемых силовым замыканием. Это возможно либо из-за неравномерного распределения точек приложения замыкающих сил, заложенного в конструкции сборочной единицы, либо из-за погрешностей деталей сборочной единицы. Например, при сборке на валу ряда деталей с непараллельными торцами его ось искривляется.

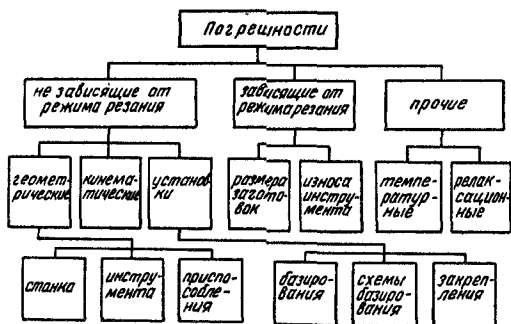


Рис. 4.42. Классификация причин возникновения погрешностей

При сборке машин и сборочных единиц нормальной точности вредные деформации составляют небольшую часть допуска на их параметры качества и поэтому считаются несущественными. При сборке же высокоточных (1...4-я степени точности) изделий эти деформации могут не только быть соизмеримыми с допуском, но и существенно превосходить его.

Погрешности механической обработки зависят от множества различных факторов. Их классификация приведена на рис. 4.42. Для погрешностей, не зависящих от режима резания, предусмотрены два уровня классификации, а для других достаточно одного. Более подробно причины формирования погрешностей механической обработки рассмотрены ниже.

4.6. Погрешности, не зависящие от режима резания

Геометрические, кинематические погрешности и погрешности установки (см. рис. 4.42) не зависят от режима резания. К *геометрическим погрешностям* станка относятся погрешности расстояний и относительных поворотов исполнительных элементов станка, биение шпинделя и погрешности формы направляющих элементов станка. Некоторые из перечисленных погрешностей переносятся на обрабатываемую заготовку (наследуются ей) и проявляются как систематическая стационарная погрешность. Например, погрешности замыкающих звеньев A_{Δ} и α_{Δ} агрегатного станка (см. рис. 4.23) полностью переносятся на обрабатываемую заготовку. В других случаях геометрические погрешности станка при переносе на деталь трансформируются. Так, неперпендикулярность оси шпинделя вертикально-фрезерного станка к направлению подачи (рис. 4.43) ведет к появлению погрешности формы Δ (неплоскостности) обработанной поверхности, поскольку ее образующей становится отрезок эллипса. Радиус кривизны обработанной поверхности можно найти по формуле $R = D/(2\alpha)$ (здесь α — угол наклона оси фрезы в радианах), а отклонение Δ от плоскости — по формуле $\Delta = \alpha B^2/(4D)$.

Смещение оси центра задней бабки по отношению к оси шпинделя токарного станка в горизонтальной плоскости приводит к появлению конусности (рис. 4.44, а), а в вертикальной плоскости придает обработанной поверхности вид гиперboloида вращения (рис. 4.44, б). В первом случае максимальное отклонение от цилиндричности $\Delta_{\text{цил}} = 2\Delta_{\text{гор}}$, а во втором $\Delta_{\text{цил}} \approx \Delta^2_{\text{верт}}/d$ (здесь d — номинальный диаметр обработанной поверхности), т. е. во много раз меньше, чем в первом.

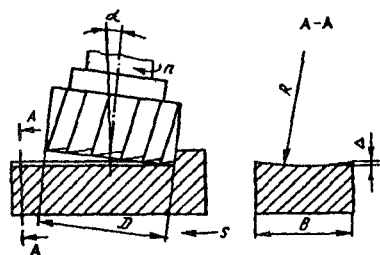


Рис. 4.43. Схема формирования отклонения от плоскостности при торцовом фрезеровании

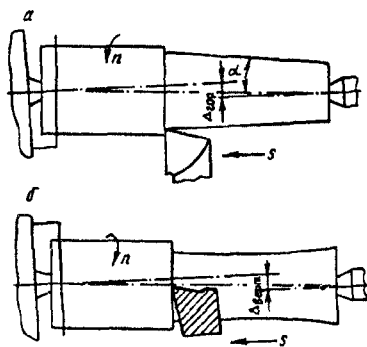


Рис. 4.44. Схемы формирования погрешностей формы при точении

Погрешности изготовления инструмента переносятся на обработанную деталь только в тех случаях, когда формообразование осуществляется методами копирования размера и (или) формы инструмента, а также методами огибания. И в данном случае погрешности могут переноситься непосредственно (погрешность диаметра развертки, погрешность формы режущей кромки фасонного инструмента и т. д.) или опосредованно с трансформацией. Например, погрешность заточки сверла (неодинаковость углов в плане для режущих кромок или их торцовое биение) приводит к разбивке просверленного отверстия и отводу его оси.

Сверление отверстий по кондукторным втулкам обеспечивает не только повышение точности положения его оси (начальное смещение уменьшается), но и уменьшение разбивки отверстия примерно на 50%. То же можно сказать и о влиянии погрешности заточки зенкеров. Разбивка отверстий в данном случае увеличивается с увеличением скорости резания, подачи, глубины резания и твердости обрабатываемого материала и уменьшается с увеличением главного угла в плане, заднего угла и жесткости технологической системы. Применение кондукторных втулок повышает точность диаметра зенкеруемых отверстий.

К геометрическим погрешностям станочных приспособлений относятся: 1) погрешности расстояний и относительных поворотов установочных и направляющих элементов; 2) погрешности расположения установочных элементов по отношению к основным базам; 3) погрешности формы установочных элементов и основных баз. Степень и способ переноса геометрических погрешностей приспособления на обработанную деталь можно установить только после анализа конкретной ситуации. Например, при изготовлении детали из групповой заготовки с одной установкой (рис. 4.45, а) биение

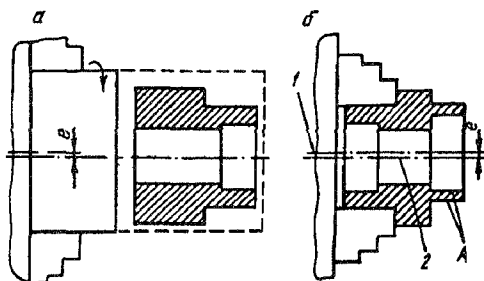


Рис. 4.45. Схемы передачи смещения e установочно-зажимных элементов приспособления обработанной детали

установочно-зажимных элементов токарного патрона, а следовательно, и биение заготовки не передается геометрически ступеням детали. Но если требуется доработка детали с другой установки (рис. 4.45, б), то вновь обработанные поверхности A будут иметь биение $2e$ относительно технологической базы, т. е. смещение осей 1 и 2 .

Источники кинематических погрешностей в цепях подач, деления и огибания металлорежущих станков — это погрешности изготовления и сборки винтовых и зубчатых передач, которые являются элементами кинематической цепи. При обработке с реверсированием движения подачи источником погрешностей могут стать зазоры в передачах. Кинематические погрешности передаются на обработанную деталь чаще всего при формообразовании винтовых и зубчатых поверхностей в виде мгновенной и (или) накопленной ошибок шага, а также в виде погрешности формы. Они могут проявляться также как погрешности позиционирования на горизонтально- и координатно-расточных станках, на обрабатывающих центрах и т. д. Погрешность позиционирования приводит к смещению оси расточенного отверстия или к погрешности выполнения размера.

Для компенсации кинематических погрешностей в станках предусмотрены дифференциальные механизмы с корригирующими элементами типа линеек или кулаков. К достоинствам механических устройств для компенсации кинематических погрешностей относятся относительная простота и достаточно высокая надежность. А главным недостатком является то обстоятельство, что по мере изнашивания элементов передачи необходимо перепрофилировать корригирующий элемент устройства. Поэтому в последнее время в прецизионных станках применяются электронные корректоры с фотодатчиками.

На рис. 4.46 показана схема компенсации зазоров в зубчатых зацеплениях гитары 3 , в резьбе ходового винта 2 и гайки 1 резьбошлифовального станка, приводящих при шлифовании с реверсом подачи без компенсатора к погрешности толщины нитки резьбы. Шпиндель 7 получает движение от шестерни 4 через палец 5 , который входит в паз диска 6 . Чтобы обеспечить одновременность начала вращения шпинделя и движения стола, при реверсе подачи

подбирают рабочий зазор δ в диске 6, соответствующий сумме зазоров в зубчатых и винтовой передачах. Установка необходимого зазора осуществляется на основании замера предварительно прошлифованной резьбы.

Погрешность установки заготовки в приспособлении обусловлена: 1) погрешностями формы и относительного положения технологических баз; 2) погрешностями, заложенными при проектировании технологического процесса (погрешность схемы базирования и погрешность схемы установки); 3) погрешностями закрепления. Погрешности технологических баз приводят к смещению Δ_b измерительных баз (рис. 4.47) и проявляются как стационарные случайные погрешности обеспечиваемых на данной операции размеров A и B , поскольку в данной задаче размер настройки A_n считается неизменным.

Погрешностью схемы базирования будем называть отклонение положения конструкторской базы от требуемого, возникающее при моделировании сопряжения технологических баз с установочными элементами приспособления. Технологические базы и установочные элементы приспособления при этом считаются идеальными, т. е. не имеющими ни погрешности формы, ни погрешности относительного положения. Условие возникновения погрешности схемы базирования — несовпадение конструкторской и технологической баз. А причиной ее возникновения являются погрешности размеров заготовки, которые выполнены на этапах обработки, предшествующих рассматриваемому. Погрешность схемы базирования относят обычно к размерам, выполняемым на рассматриваемой операции.

Например, на операции фрезерования выполняются размеры A_Δ и B_Δ (рис. 4.48), для чего режущие кромки фрезы устанавливаются относительно технологических баз на расстояниях A_n и B_n . Другие погрешности обработки, возникающие по разным при-

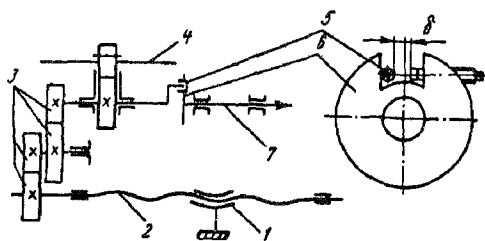


Рис. 4.46. Схема компенсации зазора в зубчатых и винтовой передачах механизма подачи резьбошлифовального станка

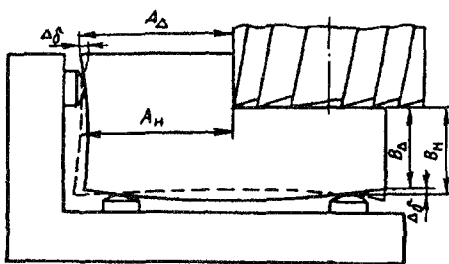


Рис. 4.47. Схема формирования погрешности базирования

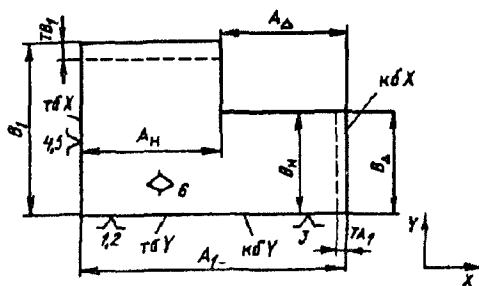


Рис 4.48. Формирование погрешности схемы базирования

чинам, в данной задаче не учитываются. При выполнении размера A_{Δ} (параллельно оси X) технологическая база $тбX$ не совпадает с конструкторской $кбX$. Следовательно, условия для возникновения погрешности схемы базирования по этому размеру имеются. До рассматриваемой операции в направлении оси X выполнен размер A_1 с допуском TA_1 .

Поскольку A_H не изменяется, то A_{Δ} может изменяться в зависимости от размера A_1 в пределах допуска TA_1 .

Погрешность схемы базирования проявляется как случайная величина, так как причина, ее порождающая (погрешность размера A_1), тоже является случайной величиной. Считается, что погрешность схемы базирования — симметричная случайная величина, т. е. ее математическое ожидание равно нулю. Тогда ее характеристикой будет максимально возможное поле рассеяния, в рассматриваемом случае TA_1 . Следовательно, можно записать:

$$\Delta_{с.б}(A_{\Delta}) = TA_1,$$

где $\Delta_{с.б}(A_{\Delta})$ — погрешность схемы базирования по размеру A_{Δ} .

При выполнении размера B_{Δ} параллельно оси Y технологическая ($тбY$) и конструкторская ($кбY$) базы совпадают. Следовательно, условий для возникновения погрешности схемы базирования нет. Действительно, случайные погрешности размера B_1 не влияют на размер B_{Δ} .

Очень часто погрешность схемы базирования зависит не от одного, а от нескольких размеров. В таких случаях алгоритм решения задачи определения погрешности схемы базирования многозвенной размерной цепи состоит из следующих этапов: 1) на операционном эскизе указываются все выполненные и выполняемые размеры, технологические и конструкторские базы, а также размер настройки (рис. 4.49,а); 2) строится размерная цепь (рис. 4.49,б); 3) определяется, согласно выражениям (4.6) или (4.7), погрешность замыкающего звена. При этом погрешность настроечного размера A_H считается равной нулю, так как является погрешностью размерной настройки и поэтому не может быть источником погрешности схемы базирования. Тогда для случая, показанного на рис. 4.49, можем записать:

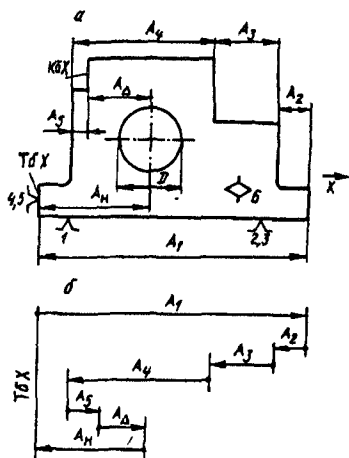


Рис. 4.49. Определение погрешности схемы базирования для многозвенной размерной цепи

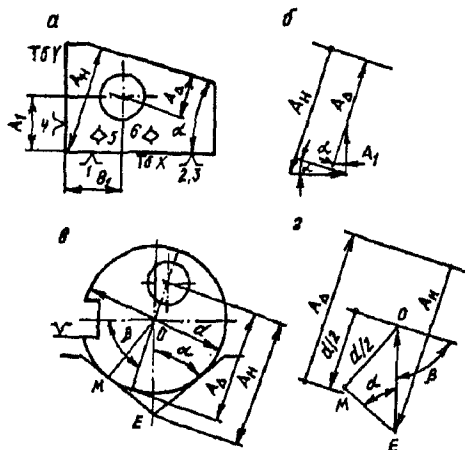


Рис. 4.50. Определение погрешности схемы базирования для плоской размерной цепи

$$\Delta_{с.б}(A_{\Delta}) = \sqrt{TA_1^2 + TA_2^2 + TA_3^2 + TA_4^2 + TA_5^2}$$

либо

$$\Delta_{с.б}(A_{\Delta}) = TA_1 + TA_2 + TA_3 + TA_4 + TA_5.$$

Погрешность схемы базирования для плоской размерной цепи определяется так же, как и для многозвенной линейной цепи. Отличие состоит только в том, что все звенья плоской размерной цепи необходимо спроецировать на направление вектора замыкающего звена. Например, размерная цепь для схемы обработки, показанной на рис. 4.50, а, изображена на рис. 4.50, б. Размерная настройка в данном случае осуществляется от точки пересечения технологических баз тбХ и тбУ. Проецируя звенья размерной цепи на A_{Δ} , получаем

$$A_H - B_1 \sin \alpha - A_1 \cos \alpha - A_{\Delta} = 0.$$

Тогда

$$\Delta_{с.б}(A_{\Delta}) = TB_1 \sin \alpha + TA_1 \cos \alpha.$$

При базировании по наружной цилиндрической поверхности с установкой на призму изменение размера d приводит не только к

призмы, но и к изменению положения точек M касания цилиндра с плоскостями призмы (рис. 4.50, в). Поэтому размерную настройку в данном случае ведут относительно точки E пересечения плоскостей призмы. Размерная цепь данной схемы обработки показана на рис. 4.50, г. Проецируя звенья этой размерной цепи на направление A_{Δ} , получаем

$$A_H - EO \sin\beta + d/2 - A_{\Delta} = 0.$$

Подставляя в это выражение $EO = d/(2 \sin\alpha)$, имеем

$$\Delta_{с.б}(A_{\Delta}) = Td(1 - \sin\beta/\sin\alpha)/2.$$

При базировании по цилиндрическому отверстию скрытой технологической базой обычно считается его ось. Однако если в качестве установочного элемента используется цилиндрический палец, то возникает неопределенность схемы установки, т. е. реальной технологической базой может быть любая образующая этого отверстия (рис. 4.51). Размер обычно откладывается от скрытой базы (оси отверстия), которая при этом является конструкторской. Заготовка вдоль оси X может смещаться в пределах зазора, максимальное значение которого равно сумме допуска на диаметр базирующего отверстия Td_1 и верхнего отклонения $\Delta_{\text{верх}}$ диаметра установочного пальца (погрешности его изготовления не учитываются, так как относятся к погрешностям приспособления). В данном случае

$$\Delta_{с.б}(A_{\Delta}) = Td_1 + \Delta_{\text{верх}}.$$

Погрешность схемы установки по цилиндрической поверхности равна нулю, если в качестве установочных элементов используются: 1) подпружиненный конический палец (рис. 4.52); 2) самоцентрирующие установочно-зажимные элементы (цанги, разжимные оправки, гидропластовые зажимы и т. д.). Под действием зажимающих сил изменяются полученное при базировании положение заготовки 2 и ее форма. Причиной изменения исходного положения заготовки являются контактные упругие деформации в местах сопряжения

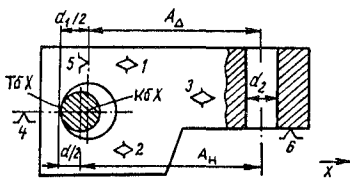


Рис. 4.51. Погрешность схемы установки на палец

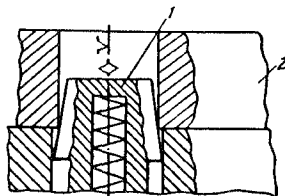


Рис. 4.52. Установка заготовки с помощью конического пальца

заготовки с установочными элементами приспособления, а также упругие деформации самого приспособления. Для партии заготовок погрешность закрепления считается равной нулю, если смещение конструкторской базы хотя и существенно, но постоянно. В этом случае смещение конструкторской базы частично компенсируется размерной настройкой. Остаются нескомпенсированными относительные повороты, возникающие из-за неравномерной нагрузки на установочные элементы.

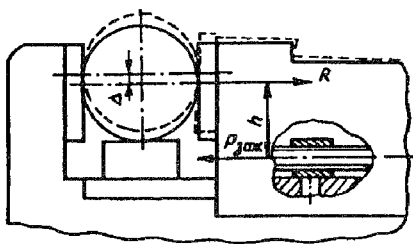


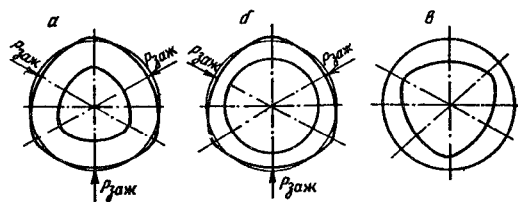
Рис. 4.53. Схема смещения заготовки в направлении, перпендикулярном к зажимающей силе

Большая часть упругих деформаций станочных приспособлений приходится на стыки, особенно в подвижных соединениях, жесткость которых намного меньше, чем жесткость затянутых стыков. Последнее обстоятельство при установке заготовок в кулачковых патронах или в тисках приводит к существенному смещению зажимаемой заготовки в направлении, перпендикулярном к зажимаемой силе. Как это видно из схемы, изображенной на рис. 4.53, указанное смещение возникает из-за поворота подвижной губки тисков парой сил (зажимающей $P_{зж}$ и реакции R) на плечо h . Зазоры и малая контактная жесткость направляющих делает этот поворот существенным.

Кольца и втулки при обработке закрепляются в самоцентрирующих патронах или на разжимных оправках. Под действием радиальных зажимающих сил эти заготовки деформируются (рис. 4.54). После обработки в закрепленном состоянии получается поверхность правильной формы. Но после открепления заготовки и ее упругого восстановления форма поверхности искажается. Такая погрешность формы сопоставима с допуском (и даже превышает его) при обработке тонкостенных и высокоточных деталей. Уменьшить ее можно, увеличив количество установочно-зажимных элементов. Если за единицу принять погрешность формы, получаемую

Рис. 4.54. Схема формирования погрешности формы при действии зажимающих сил:

a — форма заготовки после закрепления; *b* — форма расточенного отверстия в закрепленной заготовке; *в* — форма отверстия после раскрепления заготовки



при закреплении в трехкулачковом патроне, то погрешность закрепления в четырехкулачковом патроне составит 0,38, а в шестиклачковом — 0,11. Существенно уменьшает упругую деформацию увеличение ширины кулачков (угла охвата). При этом радиус цилиндрической поверхности установочно-зажимного элемента для базирования по наружной поверхности кольца должен быть равен радиусу технологической базы. При увеличении угла охвата зоны контакта кулачка с заготовкой от нормального для трехкулачкового патрона до 60° относительная погрешность формы уменьшается в 8...12 раз. Погрешность формы существенно уменьшается, если силы зажима прикладываются к торцу тонкостенной или высокоточной втулки.

4.7. Погрешности, зависящие от режима резания

Под действием составляющих силы резания элементы технологической системы деформируются и относительное положение заготовки и инструмента, сообщенное им при базировании и размерной настройке, нарушается. Один из примеров этого процесса показан на рис. 4.55, где A_n — размер настройки; $A_{\text{факт}}$ — фактический размер; y_n — проекция упругой деформации инструмента;

заготовки Δ_3 . Обратное отношение Δ_3/Δ_d будем называть коэффициентом уточнения $K_{ут}$.

Заменив малые изменения Δt и Δu их дифференциалами, с учетом формул (4.15) и (4.16) получим для случая однократного точения твердосплавным резцом

$$K_{ут} = jt^{0,1}/(0,9C_p s^{0,6} HB^2).$$

Из данного выражения следует, что коэффициент уточнения прямо пропорционален жесткости технологической системы, слабо зависит от глубины резания, существенно уменьшается при увеличении твердости заготовки и подачи. Затупление резца, увеличивая значение C_p , снижает коэффициент уточнения.

При обработке наследуется не только погрешность размера заготовки, но и погрешности формы и относительного положения, ведущие к изменению глубины резания. Из выражения (4.16) следует, что случайные изменения твердости заготовки также приводят к появлению погрешности размера. Изменение жесткости технологической системы, вызванное изменением состояния станка (нагрев подшипников) или изменением координаты точки приложения силы резания, также приводит к появлению погрешности соответственно размера или формы.

Чтобы увеличить коэффициент уточнения, а это особенно важно при низкой жесткости технологической системы, необходимо удалить припуск за несколько (n) проходов. Тогда, если жесткость технологической системы не зависит от координат точки приложения силы резания, общий коэффициент уточнения равен произведению коэффициентов уточнения после каждого прохода, т. е.

$$K_{ут} = K_{ут1} K_{ут2} \dots K_{утn}.$$

В процессе обработки режущий инструмент изнашивается, что приводит к появлению погрешности размера и (или) формы поверхности. Размерный износ инструмента в направлении, перпендикулярном к обрабатываемой поверхности, ведет к увеличению (уменьшению) размера настройки (A_n) и, кроме того, к увеличению силы P_y , а следовательно, к увеличению упругой деформации u . Изнашивание таких многолезвийных инструментов, как сверла и зенкеры, ведет к некоторому увеличению увода оси обработанного отверстия, а изнашивание разверток — к значительному увеличению разбивки отверстия (т. е. разности между диаметром отверстия и диаметром развертки).

Для увеличения размерной стойкости необходимо повышать качество заточки (прижоги, микротрещины, $Ra > 0,6$ мкм снижают стойкость в 2...3 раза), выполнять на режущей кромке фаску раз-

мером 0,05 мм под углом $\gamma = -45^\circ$ или радиусное скругление на режущей кромке. Наименьший размерный износ имеет резец со скругленной режущей кромкой, если радиус скругления $\rho = 0,04 \dots 0,05$ мм. Наилучшим способом повышения размерной стойкости является нанесение износостойких вакуумно-плазменных покрытий (TiN или трехслойных TiC + TiCN + TiN), которые повышают почти в 2 раза микротвердость режущих пластин из твердого сплава T15K6 и в 4...5 раз их стойкость при чистовой обработке.

Одной из особенностей процесса изнашивания шлифовального круга является происходящее одновременно с изнашиванием формирование волнистости на его рабочей поверхности. Экспериментально установлено, что: 1) чем меньше диаметр круга и его высота, тем быстрее возникают волны на его рабочей поверхности; 2) высота волн на круге пропорциональна скорости его размерного изнашивания и может достигать 10...30 мкм. Волнистость рабочей поверхности круга существенно увеличивает амплитуду колебаний и высотные параметры шероховатости шлифованной поверхности. Поэтому высота волн является основным ограничением стойкости шлифовального круга, который работает в режиме затупления и (или) частичного самозатачивания.

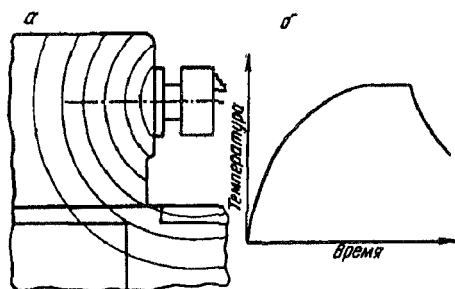
Существенное влияние на точность обработки размерный износ круга оказывает при глубинном и профильном шлифовании, при шлифовании резьбы и шлицев, так как в этих случаях часть размеров шлифованной поверхности копирует соответствующие размеры шлифовального круга.

4.8. Прочие погрешности при механической обработке

В процессе механической обработки элементы технологической системы нагреваются. Причины нагрева — процесс резания, трение в различных соединениях станка, процессы дросселирования в гидроаппаратуре, теплота от внешних источников. Из-за перерывов в работе и большой тепловой инерции тепловое поле элементов технологической системы обычно бывает неравномерным и нестационарным. Тепловые циклы определяются: временем обработки одной заготовки; длительностью смены (или ее половины); годом, в течение которого изменяется температура в цехе.

Пример температурного поля и изменения температуры во времени показаны на рис. 4.56. Разность температур в отдельных элементах станка составляет 5...50 °С. Наиболее высокая температура наблюдается в области взаимодействия инструмента и заготовки.

Рис. 4.56. Схема температурного поля передней бабки токарного станка (а) и график изменения температуры при работе и выключении станка (б)



которая нарушает геометрическую точность станка (параллельность, перпендикулярность, прямолинейность) и его размерную настройку. Наблюдения и расчеты показали, что потеря точности от тепловых деформаций элементов станка сопоставима, а иногда и превосходит по значению допускаемую погрешность обработки (табл. 4.4).

Табл. 4.4. Примеры тепловых погрешностей

Элемент станка	Вид погрешности детали	Уровень погрешности
Колонна расточного станка	Непараллельность оси от-верстия и основной базы	0,12 мм/м
Станина токарного станка	Седлообразность	0,15 мм/м
Передняя бабка токарного станка	Уменьшение диаметра	0,008...0,05 мм
	Конусность на длине 300 мм	0,006...0,04 мм
	Осевое смещение шпин-деля	0,25 мм
Колонна плоскошлифо-вального станка	Непараллельность торцов	0,1 мм/м
	Осевое смещение шпин-деля	0,15 мм

Уменьшить влияние температурных деформаций станка на точность и стабильность размеров и формы обработанных деталей можно следующим образом: 1) оградив станок от теплового воздействия внешней среды (термоконстантные цехи, защита от направленных потоков нагретого или холодного воздуха); 2) защитив станок от неравномерного нагрева со стороны источников интенсивного тепловыделения (встроенных электродвигателей, гидроприводов, резервуаров для масла) путем выделения их из общей компоновки станка; 3) приняв меры для выравнивания температурного поля станин и стоек (применив охлаждающие ребра на

наиболее нагретых частях, используя потоки воздуха от электродвигателей и пневмоустройств для обдува более холодных элементов и т. д.); 4) подогревая более холодные элементы станка, масло в гидробаке и весь станок перед началом работы до получения стационарного теплового поля; 5) увеличив частоту коррекции размерной настройки в начальный период работы станка.

Для уменьшения температурных деформаций инструмента, влияющих на точность обработки, применяют обильное охлаждение. Обработка на токарном станке с охлаждением 5%-й эмульсией (расход 1,75 л/мин) увеличивает теплоотдачу инструмента в 15 раз по сравнению с обработкой без охлаждения. Температурные деформации обрабатываемых заготовок также являются источником погрешности обработки. Теплота, выделяющаяся в процессе резания, распределяется между стружкой, инструментом и заготовкой. При точении, фрезеровании, строгании и растачивании без охлаждения большая часть выделяющегося количества теплоты переходит в стружку, а при сверлении большая часть теплоты остается в заготовке. При токарной обработке в стружку уходит 50...86% теплоты, 10...40% переходит в резец, а остальная остается в обрабатываемой заготовке и рассеивается в окружающую среду. При сверлении в стружку уходит 28% выделяющейся теплоты, 14,5% переходит в сверло, 52,5% остается в заготовке, а остальная уходит в окружающую среду.

Применение обильного охлаждения позволяет практически устранить нагревание детали, и в большинстве случаев ее тепловыми деформациями можно пренебречь. Но тепловые деформации тонкостенных заготовок с относительно большими обрабатываемыми поверхностями и неравномерной толщиной стенок могут достигать значений, сопоставимых с допусками 6-го качества точности. Так, например, при шлифовании поршня некруглость наружной шлифованной поверхности из-за наследования конфигурации внутренних элементов составляет 9 мкм.

Серьезным источником погрешностей является деформация (коробление) заготовки или детали, вызванная нарушением равновесия остаточных напряжений. Условно назовем эти погрешности *релаксационными*. Остаточные напряжения возникают на всех этапах изготовления детали, от заготовительных операций до отделочных, в результате неравномерных изменений удельного объема материала, вызванных неоднородными: нагревом или охлаждением заготовки либо детали; структурными превращениями при термической и химико-термической обработке; пластическим деформированием подповерхностных слоев заготовки. Часто одновременно действуют две причины.

В качестве примера рассмотрим первый из механизмов формирования остаточных напряжений при остывании нагретого до $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ стального диска. Сначала остывают наружные слои, которые, стремясь сократиться, сжимают еще горячую сердцевину. В результате наружные слои упругопластически растягиваются, а внутренние подвержены всестороннему сжатию и не могут деформироваться. При постепенном остывании и выравнивании температурного поля сердцевина стягивает пластически вытянутый наружный слой, создавая в нем напряжения сжатия. Во внутренней части диска формируются растягивающие напряжения, которые уравнивают напряжения сжатия наружных слоев.

При закалке на рассмотренный выше процесс неравномерного уменьшения объема накладывается увеличение удельного объема в момент перехода от аустенита к мартенситной структуре. На уровень и распределение напряжений в материале после термической обработки влияют конфигурация детали, равномерность нагрева, прокаливаемость, температура отпуска.

Возникшие в детали остаточные напряжения не остаются постоянными, а с течением времени релаксируют в сторону уменьшения. Релаксация остаточных напряжений обычно сопровождается общей деформацией детали, иногда настолько значительной, что она визуально наблюдается или приводит к трещинам. При нормальной температуре релаксация развивается очень медленно (до нескольких лет) или совсем не наблюдается. Внешние переменные нагрузки и нагрев деталей ускоряют процесс релаксации напряжений.

Искусственное нарушение равновесия остаточных напряжений путем удаления припуска при механической обработке ведет к медленному деформированию заготовки и проявляется при передаче предварительно обработанной заготовки на последующую чистовую обработку (без разрыва во времени между этими этапами). Деформирование продолжается после приемки детали и в процессе ее эксплуатации в машине и достигает у маложестких деталей довольно больших значений (до $1...1,5\text{ мм}$).

Основным способом борьбы с релаксационными погрешностями является старение, которое выполняется обычно после предварительной обработки, а иногда в целях получения деталей высокой точности и после чистовой обработки перед отделочной. При длительной выдержке чугунных отливок в заделе в течение $6...18$ месяцев (естественное старение) остаточные напряжения уменьшаются только на $30...35\%$. Полное снятие остаточных литейных напряжений (искусственное старение) достигается отжигом с медленным (со скоростью $50...150\text{ }^{\circ}\text{C}$ в час) нагревом отливок до $500...550\text{ }^{\circ}\text{C}$, выдержкой при этой температуре в течение $2...10\text{ ч}$

и медленным охлаждением (со скоростью 30...50 °С в час) до 200...300 °С.

Старение стальных закаленных деталей заключается в их нагреве до 150...180 °С и выдержке при этой температуре в течение 5...25 ч. Оно применяется для измерительных инструментов, точных деталей топливной аппаратуры и т. д.

4.9. Обеспечение точности обработки

4.9.1. Характеристики точности и стабильности технологического перехода

За время реализации перехода на технологическую систему действует множество факторов, часть которых (износ инструмента, тепловые деформации и т. п.) вызывает систематические, а часть (колебания припуска, колебания твердости заготовки и т. п.) — случайные погрешности обработки. Кроме того, зависимости свя

3) корреляционным уравнением

$$K(i_1, i_2) = M((A(i_1) - \bar{A}(i_2))(A(i_2) - \bar{A}(i_1))) ,$$

где M — символ математического ожидания. Функция $\bar{A}(i)$ является неслучайной, отражающей влияние детерминированных факторов на исследуемый параметр. Функция $D(A(i))$ характеризует неслучайную зависимость параметра рассеяния размера от порядкового номера обработанной детали. Считается, что эти параметры характеризуют так называемую «мгновенную» точность обработки. Корреляционное уравнение отражает тесноту связи значений A для деталей с номерами i_1 и i_2 .

Дело в том, что влияние некоторых факторов на отклонения размера A в данном цикле обработки не сразу прекращается в последующих циклах. Примером может служить тепловая деформация технологической системы, вызванная случайными отклонениями от средних значений припуска и твердости заготовки. Возникшая на i -м цикле вследствие разогрева (по указанной причине) деформация системы должна сказаться не только на отклонении размера детали, обработанной на этом же цикле, но и на отклонениях размеров в циклах $i+1$, $i+2$ и т. д. Если

$K(i_1, i_2) = 0$, то значения $A(i_1)$ и $A(i_2)$ являются независимыми.

В зависимости от свойств технологической системы возможны различные по типу случайные процессы:

1) стационарные, если $\bar{A}(i) = \text{const}$, $D(A(i)) = \text{const}$, $K(i_1, i_2) = K(\Delta_i)$, где $\Delta_i = i_2 - i_1$;

2) нестационарные, если A или D изменяется в зависимости от номера обработанной детали.

Функции \bar{A} , D и K можно определить экспериментально, если имеется достаточное число реализаций. Когда процесс стационарный, для определения параметров указанных функций достаточно одной реализации. Однако и в случае нестационарного по A процесса, который чаще всего встречается при механической обработке, с достаточной для практики точностью можно для определения параметров функций \bar{A} , D и K использовать одну реализацию. Для этого необходимо разделить размер $\bar{A}(i)$ на две составляющие (рис. 4.57):

$$A(i) = \bar{A}(i) + X(i) ,$$

где $X(i)$ — отклонения размера A от кривой регрессии $\bar{A}(i)$, которая получается «сглаживанием» результатов экс-

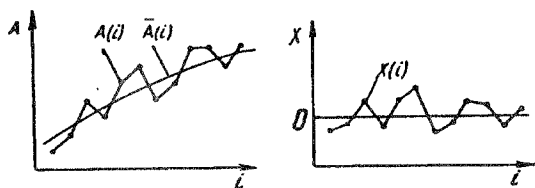


Рис. 4.57. Схемы разделения погрешностей обработки

перимента полиномом по методу наименьших квадратов. Таким образом,

$$\bar{A}(i) = b_0 + b_1 i + b_2 i^2,$$

где b_i — коэффициент полинома.

Дисперсия процесса в данном случае оценивается величиной S^2 :

$$D(X(i)) = S^2 = \left(\sum_{i=1}^n (A(i) - \bar{A}(i))^2 \right) / (n - 1).$$

Предполагается, что случайные отклонения $X(i)$ складываются из двух: $V(i)$ — скорректированной случайной составляющей, вызываемой случайным фактором с последствием, и $Z(i)$ — независимой случайной составляющей, т. е.

$$X(i) = V(i) + Z(i).$$

Если известны значения $A(i)$ для $i = \overline{1, n}$, то значения корреляционной функции определяются по выражению

$$K(p) = \left(\sum_{i=1}^{n-p} A(i) A(i+p) \right) / (n-p). \quad (4.17)$$

Типовой график корреляционной функции показан на рис. 4.58. Степень тесноты связи между соседними значениями $A(i)$ и $A(i+1)$ характеризуется коэффициентом корреляции ρ :

$$\rho = K(1) / D(X(i)).$$

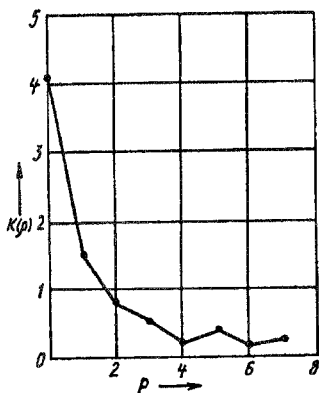


Рис. 4.58. График корреляционной функции центрированных отклонений размеров

4.9.2. Статистическое регулирование точности обработки

Статистическое регулирование является простым и наглядным методом управления точностью обработки. Для его реализации на предварительно настроенном станке через определенные промежутки времени берутся выборки из m деталей, обработанных последними в данном промежутке. Детали измеряются, и результаты измерения заносятся в контрольную карту в виде точек, которые должны располагаться в пределах, заранее рассчитанных и нанесенных на контрольную карту границ. Тогда считается, что технологический процесс протекает удовлетворительно. В случае выхода размеров за пределы контрольных границ необходимо выполнить коррекцию размерной настройки. Таким образом, статистическое регулирование дает возможность осуществить предупредительный контроль и избежать брака при обработке, а также снизить трудоемкость контрольных операций, так как вместо сплошного контроля осуществляется выборочный.

Условиями целесообразности применения статистического регулирования являются: 1) массовое производство; 2) наличие систематической нестационарной составляющей общей погрешности обработки; 3) достаточно большой период размерной стойкости инструмента; 4) достаточный запас точности операции, который характеризуется коэффициентом запаса точности $K_{з.т}$:

$$K_{з.т} = TA / \left(6\sqrt{D(X(i))} \right) ,$$

где TA — допуск на контролируемый размер; $D(X(i))$ — дисперсия. Минимальное значение $K_{з.т} = 1,2$.

Стандартизованы и применяются в промышленности два метода статистического регулирования: 1) *метод средних и размахов*; 2) *метод медиан и крайних значений*. Первый метод рекомендуется применять в случаях, когда требования к точности достаточно высоки и когда необходимо обеспечить безопасность потребителя (авиационная техника, автомобили и т. п.). Второй метод проще реализовать, так как он не требует вычислений, но дает менее достоверные результаты.

Для реализации метода средних и размахов подготавливают заранее две точечные диаграммы, обычно объединенные в одну контрольную карту (рис. 4.59). На точечной диаграмме средних отмечают верхнюю (ВТ) и нижнюю (НТ) технологические границы. При наружной обработке ВТ совпадает с максимальным размером A_{\max} , а НТ выше нижней границы допуска на погрешность измерения. При обработке отверстий наоборот: НТ совпадает с минимальным размером, а ВТ ниже верхней границы допуска на погрешность измерения $\Delta_{из}$. Обычно принимают $\Delta_{из} = 0,1TA$.

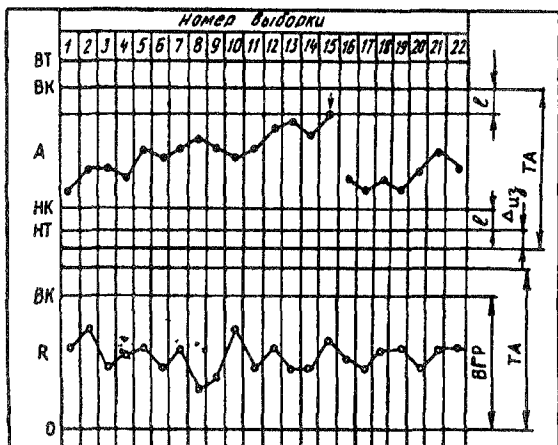


Рис. 4.59. Контрольная карта статистического регулирования методом средних и размахов

Допустимое поле изменения среднего арифметического \bar{A}_m малой выборки ограничивается верхней (BK) и нижней (НК) контрольными границами, которые отстоят от VT и HT на одинаковом расстоянии l . В зависимости от значения $K_{3,T}$ значение l выбирается по-разному. Если $1,18 < K_{3,T} < 1,34$, то $l = KTA$, где K — коэффициент, зависящий от размера выборки m следующим образом:

m , шт.	.....	4	5	6	7	8	9
K	.....	0,25	0,276	0,296	0,311	0,323	0,334

Если $K_{3,T} > 1,35$, то значение l выбирается в зависимости от оценки «мгновенного» поля рассеяния, которая также определяется в предварительных экспериментах. Тогда, согласно рис. 4.21,

$$l = 0,5\omega A (1 - 1/\sqrt{m}) .$$

На диаграмме размахов в пределах от нижней границы допуска до VT наносится одна верхняя граница размахов (ВГР), которая определяет допустимые значения размахов $R = A_{\max} - A_{\min}$ в любой выборке. Если $1,18 < K_{3,T} < 1,34$, то $ВГР = K_1 TA$, где K_1 зависит от размера выборки следующим образом:

m , шт.	.....	4	5	6	7	8	9
K_1	.....	0,780	0,815	0,840	0,860	0,875	0,890

Если $K_{3,T} > 1,35$, то значение l выбирается в зависимости от определенного заранее мгновенного стандартного отклонения размеров S . $ВГР = K_2 S$, где K_2 зависит от размера выборки:

m , шт.	5	6	7	8	9
K_2	4,918	5,078	5,206	5,307	5,394

Необходимо отметить, что указанный расчет контрольных границ на контрольных картах статистического регулирования допускает возможность появления ошибок первого и второго рода. Ошибки первого рода заключаются в подаче ложного сигнала о разладке процесса, которой на самом деле нет. Ошибки второго рода состоят, наоборот, в неправильном заключении о нормальном ходе процесса, когда на самом деле он уже разлажен. Вероятность таких ошибок при наблюдении за средними или медианами составляет 0,027. Эта вероятность очень мала, однако ложный сигнал может появиться и при очень малой вероятности. Поэтому во избежание ненужных вмешательств в процесс обработки рекомендуется при появлении сигнала о разладке процесса тотчас же проверить его путем взятия повторной выборки.

С экономической точки зрения выгодно увеличивать промежуток времени между взятием контрольных проб. Но при увеличении длительности межпроверочного периода $\tau_{\text{кон}}$ возрастает вероятность брака. Оптимальное значение $\tau_{\text{кон}}$ определяется экспериментально при внедрении технологического процесса со статистическим регулированием точности. Анализ контрольных карт, оформленных за время эксплуатации нескольких инструментов (10...15), позволяет определять среднее значение размерной стойкости инструмента по количеству обработанных заготовок N_3 и поле его рассеяния ωN_3 , где N_3 — среднее количество заготовок, обработанных за период между коррекциями размерной настройки. В течение периода, соответствующего $N_3 - 0,5\omega N_3$, необходимо выполнить не менее четырех контрольных операций, что позволит определить темп смещения уровня размерной настройки и сделать прогноз о количестве заготовок, которые могут быть обработаны до необходимости в коррекции.

4.9.3. Автоматическое управление точностью обработки по выходным данным

Выходным параметром технологической операции может быть непосредственно размер обработанной заготовки, измеряемый прямым или косвенным способом, положение режущей кромки инструмента (рабочей поверхности шлифовального круга) или положение исполнительных органов станка. Задача компенсации действия источников технологических погрешностей решается с максимальной эффективностью в том случае, когда выходным параметром является непосредственно размер обрабатываемой заготовки. Этот параметр

может контролироваться после обработки заготовки (вне зоны обработки) или во время ее обработки.

По результатам контроля система управления вырабатывает управляющую команду либо на коррекцию размерной настройки, либо на изменение скорости и направления рабочей подачи. В первом случае различают одностороннюю и двустороннюю коррекции размерной настройки. Односторонняя коррекция уровня размерной настройки применяется чаще всего при обработке на станках с непрерывным процессом. Исполнительные органы таких станков в процессе обработки не имеют подачи в направлении выполняемого размера, в этом направлении их сдвигают только для изменения уровня настройки. К станкам данной группы относятся бесцентрово-шлифовальные, работающие методом «на проход», плоскошлифовальные для глубинного шлифования и др. Доминирующим фактором, определяющим смещение уровня размерной настройки этих станков, является износ шлифовального круга. Обычно его влияние настолько сильнее влияния прочих факторов, что уровень настройки получает лишь одностороннее смещение. Поэтому при коррекции уровня настройки таких станков подаются командные импульсы лишь одного знака, в соответствии с которыми смещаются массивные рабочие органы станка.

На рис. 4.60 показана принципиальная схема односторонней коррекции уровня настройки при бесцентровом шлифовании колец подшипников. Прошлифованные кольца, двигаясь сплошным потоком, поступают на позицию измерения и контролируются измерительным устройством (ИУ). Результаты измерения (в виде уровней напряжения) поступают в счетно-логическое устройство (СЛУ), которое по определенному алгоритму вырабатывает команду, передаваемую исполнительному устройству (ИСУ) или приводу, который обеспечивает выполнение данной команды, т. е. изменяет позицию бабки шлифовального круга.

На рис. 4.61 изображена принципиальная схема односторонней коррекции уровня настройки с помощью регулируемого упора.

Обработка ведется врезным шлифованием до регулируемого упора 1. Шлифованная заготовка передается в измерительную позицию, где контролируется измерительным устройством. По сигналу СЛУ исполнительное устройство изменяет положение упора 1. Основное пре

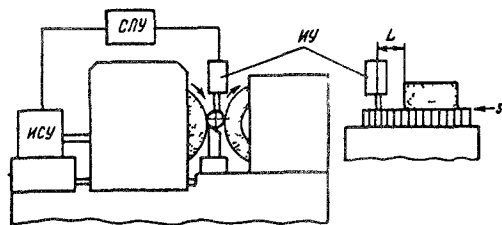


Рис 4.60 Схема односторонней коррекции уровня размерной настройки

имущество этого способа по сравнению со способом, иллюстрируемым рис. 4.60, заключается в том, что малый подналадочный импульс сообщается не массивной бабке, а легкому упору, точность перемещения которого выше точности обработки механизма подачи.

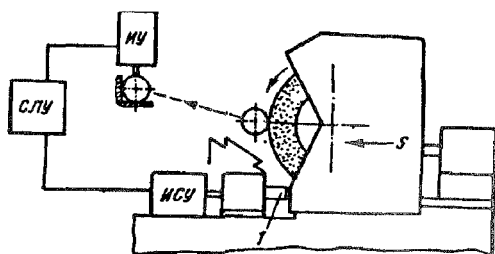


Рис. 4.61. Схема односторонней коррекции уровня размерной настройки с помощью регулируемого упора

СЛЮ данных систем автоматической коррекции уровня размерной настройки может работать по одному из приведенных ниже алгоритмов.

1. Коррекция настройки по нескольким (от двух до пяти) последовательно обработанным заготовкам. В данном случае контролируются размеры всех последовательно обработанных заготовок. Корректирующий импульс подается только тогда, когда размеры нескольких последовательных обработанных заготовок превысят контрольную границу. В частном случае корректирующий импульс может подаваться, если размеры только одной заготовки превысят контрольную границу. В данном случае аппаратно СЛЮ является самым простым. Однако возможно запаздывание сигнала на коррекцию, особенно при большой скорости изменения уровня центра рассеяния размеров обработанных заготовок, и, следовательно, появление брака.

2. Коррекция настройки по положению центра группирования. В данном случае СЛЮ вычисляет среднее значение размера \bar{A}_{mi} в выборке из m обработанных заготовок. Когда \bar{A}_{mi} достигает контрольной границы, выдается сигнал на коррекцию размерной настройки. Удобнее всего вести расчет \bar{A}_{mi} по следующей рекуррентной формуле (если $i > m$):

$$\bar{A}_{mi} = \bar{A}_{m,i-1} + (A_i - A_{i-m})/m,$$

где i — текущий номер обработанной детали с размером A_i . При таком расчете требуемый объем памяти не зависит от размера выборки, так как необходимы элементы для запоминания только четырех величин: $A_{m,i-1}$, A_i , A_{i-m} и m .

Чем больше объем выборки, тем точнее оценка \bar{A}_{mi} , но увеличивать m больше чем до 7...9 не имеет смысла, так как при этом темп уменьшения доверительного интервала ξ резко замедляется.

Действительно, согласно формуле (4.1), доверительный интервал для \bar{A}_m обратно пропорционален \sqrt{m} и при доверительной вероятности 99%

m , шт.	3	4	5	6	7	8	9	10
ε/σ	5,72	2,92	2,06	1,65	1,40	1,24	1,12	1,03

Данный способ обеспечивает большую надежность управления, чем предыдущий, но требует более сложного, а следовательно, и более дорогого СЛУ.

3. Коррекция настройки по скользящей медиане. В данном случае также непрерывно анализируется скользящая выборка из m обработанных заготовок, но не производятся расчеты. Сигнал на коррекцию выдается, если $m/2$ (или больше) заготовок выборки имеют размер, больший установленного контрольной границей. В данном случае грубые погрешности (измерения или обработки) меньше влияют на надежность управления, так как уровни отклонений размеров не имеют значения для выработки сигнала. Важно лишь, чтобы 50% заготовок выборки имело размер больше граничного, а 50% — меньше.

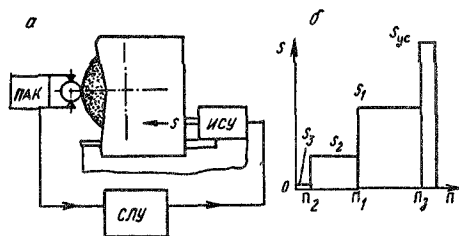
4. Коррекция настройки по накопленной медиане. Способ отличается от предыдущего тем, что счет заготовок начинается сразу после выполнения коррекции, а контрольная граница расположена посередине поля допуска. Сигнал о следующей коррекции также поступает, когда 50% обработанных после предыдущей коррекции заготовок будет иметь размер, больший установленного контрольного, а 50% — меньший.

Имитационное моделирование различных способов работы СЛУ показало, что степень подавления систематической составляющей погрешности зависит не только от способа, но и от выбранного значения корректирующего импульса.

Двусторонняя коррекция размерной настройки применяется в тех случаях, когда при отсутствии существенных доминирующих причин, определяющих одностороннее смещение размеров обработанных заготовок, уровень настройки смещается периодически в одну или другую сторону. Для двусторонней коррекции используются обычно те же способы работы СЛУ, что и для односторонней. Но устройства для двусторонней коррекции имеют двойной комплект ряда элементов, так как устанавливаются две контрольные границы. Из перечисленных выше способов работы СЛУ в данном случае не годится лишь четвертый (по накопленной медиане). Но его можно условно рассматривать как двусторонний, где две контрольные границы сливаются в одну.

При непрерывном процессе обработки, когда применяется односторонняя коррекция уровня настройки, влияние запаздывания сиг-

Рис. 4.62. Схема автоматического управления точностью при контроле размера в процессе обработки (s_{uc} — подача ускоренного врезания; s_1, s_2 — подачи при предварительной и чистой обработке; s_3 — микроподача на этапе выхаживания)



каже, в дальнейшем может быть в какой-то степени изменено со

ответствующим расположением контрольной границы. Расстояние от ИУ до зоны обработки влияет в противоположных «направле-
ниях». Удаление ИУ от зоны обработки повышает точность и на-

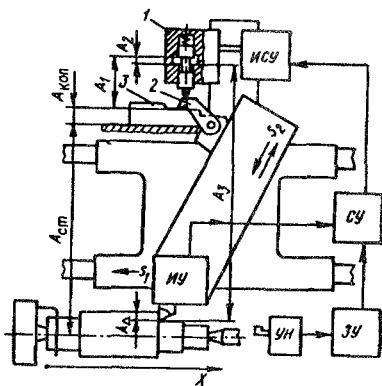


Рис. 4.63. Схема управления точностью обработки путем компенсации изменения упругой деформации изменением уровня размерной настройки

кущего значения контролируемого параметра с заданным его уровнем. Назначение таких систем — уменьшение случайных отклонений размеров, связанных со случайными и систематическими изменениями упругой деформации технологической системы. Поэтому контролируемым параметром в данном случае является либо отклонение упругой деформации от заданного уровня, либо сила резания P_y , связанная с упругой деформацией функционально.

На рис. 4.63 показана схема управления точностью обработки на токарном гидроконтрольном полуавтомате путем компенсации изменения упругой деформации технологической системы соответствующим изменением уровня размерной настройки. Чтобы фактический размер оставался постоянным, необходимо соблюдать равенство $\Delta A_n = -\Delta y$, где ΔA_n — изменение уровня размерной настройки; Δy — изменение упругой деформации. В системе, показанной на рис. 4.63, измерительное устройство непрерывно определяет уровень радиальной силы P_y , который косвенно оценивает уровень упругой деформации y согласно выражению

$$y = P_y / j,$$

где j — жесткость технологической системы. Это значение P_y сравнивается в устройстве сравнения (СУ) с заданным значением (уставкой), которое передается в СУ задающим устройством (ЗУ).

Если полагают, что жесткость можно считать постоянной, то и уставка будет постоянной. Но если обрабатывают маложесткие валы и жесткости передней и задней бабок сильно различаются, то ЗУ вырабатывает переменный сигнал, зависящий от координаты x . Разность между сигналами ИУ и ЗУ, пропорциональная Δy , поступает в исполнительное устройство, которое перемещает корпус I золотника в ту сторону и до тех пор, пока сигнал, выходящий из СУ, не станет равным нулю. При перемещении корпуса золотника изменяются размер A_2 и, согласно показанной на рис. 4.63 размерной цепи, размер $A_{\text{конт}}$ на копии. Действительно,

$$A_{\Delta} = A_{\text{ст}} + A_{\text{коп}} + A_1 - A_2 - A_3 ,$$

где $A_{\text{ст}}$, A_1 — постоянные станка; $A_{\text{коп}}$ — размер на копии; A_2 , A_3 — размеры цепи в золотнике управления, соответствующие равновесному положению суппорта.

Для компенсации размерного износа резца система снабжена устройством установки нуля (УН). Перед обработкой каждой заготовки партии резец подводится к измерительному рычагу УН. При

ность на следующих операциях технологического процесса обработки за счет увеличения точности межоперационных размеров. Недостатком данного способа управления является относительная трудность в создании механизмов малых плавных перемещений, работающих с точностью до нескольких микрометров.

Указанного недостатка лишена система управления путем стабилизации упругих деформаций. Однако из-за изменения подачи обработанные заготовки имеют разную шероховатость. Наилучшими свойствами обладают комбинированные системы управления точностью, которые в заданном диапазоне подач ($s_{\min} \dots s_{\max}$) стабилизируют упругую деформацию, а при $s > s_{\max}$ компенсируют изменения упругой деформации изменением размерной настройки.

В настоящее время прошли лабораторные испытания системы управления точностью обработки на токарных, фрезерных, расточных, кругло- и внутришлифовальных, шлицешлифовальных, отрезных и других станках. При этом принципиальная схема управления осталась той же. Различие только в способах получения информации об упругих деформациях технологической системы и способах изменения уровня размерной настройки или стабилизации упругих деформаций. Так, в некоторых случаях вместо силы P_y измеряется мощность привода главного движения, а для стабилизации упругих перемещений изменяется угол резания путем поворота резца вокруг горизонтальной оси, проходящей через его вершину.

4.10. Обеспечение качества обработанной поверхности

4.10.1. Показатели качества поверхностей деталей машин

Качество поверхностей деталей машин определяется совокупностью параметров шероховатости, физико-механического состояния и структуры подповерхностного слоя, а также распределением в нем остаточных напряжений. Шероховатость характеризует отклонения реальной поверхности от идеальной, имеющие относительно малый шаг. Параметры шероховатости принято определять в сечении реальной поверхности плоскостью, перпендикулярной к ее идеальному образу. Полученный при этом профиль рассматривается на определенной стандартизованной базовой длине.

В результате анализа профиля сечения с помощью профилографа-профилометра модели 253 можно получить следующие параметры шероховатости: 1) высоту неровностей R_z профиля по десяти точкам; 2) среднее арифметическое отклонение R_a профиля; 3) средний шаг S_m неровностей профиля; 4) наибольшую высоту R_{max} неровностей профиля; 5) относительную опорную длину t_p профиля на уровне p . Значение t_p равно отношению суммы отрезков,

которые отсекаются на заданном уровне у выступов неровностей линией, эквидистантной средней линии, к базовой длине. Уровень p задается как часть наибольшей высоты неровностей R_{max} от линии выступов в процентах или микрометрах. Значения R_a , R_z , S_m и R_{max} измеряются в микрометрах. Значения R_a и R_z связаны равенством $R_z = 4 R_a$.

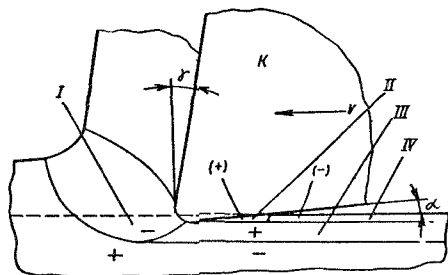


Рис. 4.65. Схема зон пластического деформирования и напряжений при резании лезвийным инструментом

Как уже было отмечено ранее, остаточные напряжения возникают на всех этапах технологического процесса — от заготовительного до отделочного. При воздействии режущего клина K (рис. 4.65) на заготовку в ее подповерхностном слое протекает процесс неравномерного пластического деформирования. В зоне I стружкообразование происходит в условиях интенсивных нормальных сжимающих (—) напряжений, которые проникают под поверхность резания и уравниваются упругими растягивающими (+) напряжениями во внутренних слоях заготовки. В зоне II силы трения о заданную поверхность режущего клина вызывают пластическое растяжение в тонком слое под поверхностью резания. После выхода из зоны резания напряжения в пластически деформированном подповерхностном слое (зоны III и IV) изменяют знак.

В пластически деформированном подповерхностном слое снижается (на 0,3...0,8 %) плотность материала, повышаются его твердость и хрупкость, уменьшаются пластичность и вязкость, изменяются магнитные и некоторые другие свойства. Упрочнение (наклеп) материала подповерхностного слоя зависит от степени его пластической деформации.

Выделяющаяся в зоне резания теплота нагревает тонкий подповерхностный слой до высоких температур, что вызывает увеличение его удельного объема. Однако уровень напряжений в разогретом слое низок в связи со значительным снижением модуля упругости и повышением пластичности. После прекращения воздействия режущего клина происходит быстрое охлаждение металла подповерхностного слоя, сопровождающееся его сжатием, чему препятствуют нижележащие слои металла, оставшиеся холодными. В результате в нагретом подповерхностном слое развиваются остаточные напряжения растяжения, а в нижележащих слоях — уравновешивающие их напряжения сжатия.

С другой стороны, повышение температуры в зоне резания и

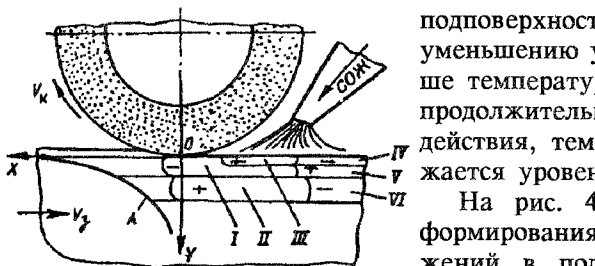


Рис. 4.66. Схема формирования остаточных напряжений в подповерхностном слое при шлифовании

подповерхностном слое ведет к уменьшению упрочнения. Чем выше температура нагрева и больше продолжительность теплового воздействия, тем значительно понижается уровень упрочнения.

На рис. 4.66 показана схема формирования остаточных напряжений в подповерхностном слое при шлифовании, когда главное влияние на их уровень и характер изменения оказывает нестационарное и неравномерное температурное поле.

В момент максимального нагрева это поле характеризуется кривой А. Поле вызывает в зоне I сжимающие напряжения в связи с тем, что нижележащий слой заготовки (зона II) препятствует ее термическому расширению. Эти напряжения обычно превышают предел текучести шлифуемого материала (при высокой температуре), что приводит к пластическим деформациям сжатия в зоне I. Естественно, в зоне II возникают временные растягивающие напряжения.

После выхода из зоны шлифования обрабатываемая поверхность под действием СОЖ резко охлаждается, вследствие чего образуется зона III, в которой формируются временные растягивающие напряжения. Часто и они превышают предел текучести шлифуемого материала. По мере удаления от зоны шлифования температура в подповерхностном слое выравнивается, что в связи с пластической деформацией в зонах I и III приводит к изменению знака временных напряжений (зоны IV, V и VI) и формированию таким образом остаточных напряжений.

При шлифовании закаленных сталей уровень остаточных напряжений и характер их изменения по глубине подповерхностного слоя существенно зависят от структурных превращений в материале под действием кратковременных тепловых импульсов. Эти структурные изменения принято называть *прижогами*. В зависимости от внешнего вида прижоги бывают: сплошные — вся поверхность покрыта прижогом; пятнистые — на шлифованной поверхности имеются отдельные пятна прижогов; однородные штриховые — вся шлифованная поверхность покрыта однородными штриховыми прижогами; циклические штриховые — штриховые прижоги циклически повторяются на шлифованной детали.

По характеру изменения микроструктуры подповерхностного слоя различают: прижоги отпуска — в подповерхностном слое в местах прижога имеются только структуры отпуска (сорбит или троостит,

сорбито-троостит или троостито-мартенсит); прижоги вторичной закалки с отпуском — в подповерхностном слое шлифованной детали в местах прижога тонкий слой вторичной закалки расположен на более мягкой основе отпущенного слоя. Структура слоя вторичной закалки может содержать мартенсит или аустенит (для легированных сталей).

Изменение структуры подповерхностного слоя ведет к изменению удельной плотности материала в нем и, следовательно, к появлению собственной схемы распределения остаточных напряжений, которые складываются с полученными под воздействием «теплового удара». В зависимости от сочетания методов и режимов обработки в подповерхностном слое обработанной заготовки образуются остаточные напряжения с различными законами изменения по глубине.

4.10.2. Влияние способов и условий обработки на шероховатость поверхности

Все многообразные причины, обуславливающие шероховатость обработанной поверхности, можно объединить в три основные группы: причины, связанные с геометрией процесса резания; причины, связанные с пластической деформацией обрабатываемого материала; вибрации инструмента относительно обрабатываемой поверхности.

С геометрической точки зрения высота, форма и относительное расположение неровностей (направления обработанных рисок) определяются формой и состоянием формообразующих элементов инструмента и теми элементами режима обработки, которые влияют на изменение траектории его движения относительно заготовки.

На рис. 4.67 показаны схемы формирования «геометрической» шероховатости при точении (а), торцовом фрезеровании (б) и резец с дополнительным режуще-зачищающим лезвием (в)

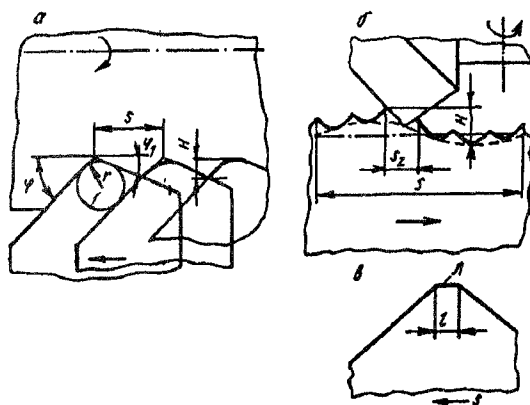


Рис. 4.67. Формирование «геометрической» шероховатости при точении (а), торцовом фрезеровании (б) и резец с дополнительным режуще-зачищающим лезвием (в)

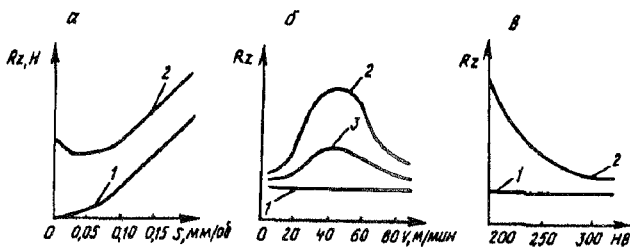


Рис. 4.68. Влияние пластических деформаций в зоне резания на высоту неровностей обработанной поверхности

В осевом сечении обработанной поверхности образуются гребешки (рис. 4.67, а), высота которых зависит от подачи s , углов в плане φ и φ_1 , радиуса r скругления режущей кромки. При достаточно малой подаче высота H зависит уже только от r и s . Зависимость «геометрической» шероховатости высотой H от подачи s отражает кривая 1 на рис. 4.68, а.

При торцовом фрезеровании H зависит не только от подачи на зуб s_z , но и от торцового биения режущих кромок (рис. 4.67, б). В данном случае «геометрические» гребешки касаются не прямой линии, а синусоиды с шагом $s = s_z z$, где z — число зубьев фрезы. Из-за неравномерного положения вершин резцов фрезы опорная кривая получается сложнее.

При обработке резанием в подповерхностном слое протекают два процесса — пластическое деформирование и упругое восстановление (зоны I и II на рис. 4.65). Эти процессы приводят к увеличению шероховатости по сравнению с H , что иллюстрируется экспериментальными графиками на рис. 4.68, где линии 1 отражают зависимость H от рассматриваемого фактора. Эксперименты показали, что уменьшение подачи от 0,1 до 0,02 мм/об при точении конструкционных сталей практически не влияет на Rz (рис. 4.68, а, кривая 2). Неровности обработанной поверхности в этом случае образуются не столько под влиянием геометрических причин, сколько в результате пластических и упругих деформаций. При очень малых подачах Rz может даже увеличиваться вследствие потери устойчивости движения суппорта, который начинает перемещаться не плавно, а рывками.

Существенное влияние на пластические деформации в подповерхностном слое оказывает скорость резания. Кроме того, она обуславливает процесс образования нароста, который значительно повышает уровень Rz . В зависимости от значения подачи и пластических свойств заготовки максимальная высота нароста приходится на скорость в диапазоне от 20 до 40 м/мин, что отражается на значении Rz (кривая 2 на рис. 4.68, б). Применение охлаждения сульфоземлем снижает значение Rz , но при этом сохраняется характер зависимости Rz от скорости резания (кривая 3 на рис.

4.68,б). При увеличении скорости резания сверх определенного граничного значения Rz перестает изменяться. Граничная скорость $v_{гр}$ резания зависит от подачи. Например, для конструкционных сталей присущи такие соотношения s и $v_{гр}$:

s , мм/об.	.....	0,1	0,2	0,3	0,4
$v_{гр}$, м/мин	.....	190	145	105	92

Увеличение твердости заготовки ведет к уменьшению ее пластичности и, следовательно, к уменьшению уровня пластических деформаций в подповерхностном слое. Поэтому, как показывают эксперименты (рис. 4.68,б), с увеличением твердости уровень Rz снижается. Однако при увеличении твердости сверх определенного предела (300 НВ или 32 HRC₃) ее влияние на Rz незначительно. При повышении твердости снижается зависимость Rz от скорости резания.

При затуплении инструмента на его режущих лезвиях образуются неровности, которые переносятся на поверхность резания и обработанную поверхность. Кроме того, скругление режущей кромки, обязательно сопровождающее процесс изнашивания, и увеличение площадки трения на задней грани режущего клина приводят к существенному увеличению пластических деформаций в подповерхностном слое, что также повышает высоту неровностей.

При обработке инструментом, у которого предусмотрено дополнительное режущее лезвие Л (рис. 4.67,в) длиной $l > s$, параллельное направлению подачи s (образующей обработанной поверхности), высота H неровностей, возникающих по геометрическим причинам, должна быть равна нулю. Неровности на обработанной поверхности в данном случае возникают вследствие пластического деформирования, трения по задней грани, изменения контура дополнительной режущей кромки из-за ее износа. Экспериментальные исследования показали, что при достаточно высокой твердости заготовки (твердость больше 32 HRC₃) коэффициент перекрытия $K_{пер} = l/s$ в пределах 2...6 существенно уменьшает высотные параметры шероховатости.

Вибрации (вынужденные и автоколебания), сопровождающие процесс резания, обычно увеличивают шероховатость. Например,

абразивного материала шлифовального круга. Чем меньше зерна, тем меньше их разновысотность и расстояние между ними вдоль образующей рабочей поверхности круга. Процесс изнашивания круга после некоторого этапа приработки ведет к увеличению параметра Ra . Главной причиной этого является неравномерность износа. На рабочей поверхности шлифовального круга образуются волны. Амплитуда волнистости может достигать 15...25 мкм. Эти волны вызывают высокочастотные радиальные колебания, резко увеличивающие уровень Ra . Характер и темп изменения Ra зависят от метода правки и свойств правящего инструмента.

Окончательно уровень Ra формируется обычно в конце цикла шлифования на этапе выхаживания (см. § 2.9). Однако если время выхаживания превышает некоторый оптимальный уровень $\tau_{\text{опт}}$, то дальнейшее выхаживание не дает эффекта. Наоборот, при очень малых значениях силы P_y процесс шлифования часто становится неустойчивым, возникают автоколебания, ведущие к увеличению значения параметра Ra (рис. 4.69, *a*). Вообще, при шлифовании вибрации являются одной из основных причин образования шероховатости (и волнистости). Характер влияния вибраций, вызванных дисбалансом шлифовального круга, при различных уровнях жесткости j_1 и j_2 технологической системы и постоянном времени выхаживания показан на рис. 4.69, *б*.

На высотные параметры шероховатости, образующейся при обработке способами ППД, оказывают существенное влияние давление в зоне контакта инструмента и заготовки, продольная подача, форма и размеры деформирующего элемента, исходная шероховатость обрабатываемой поверхности и физико-механические свойства материала обрабатываемой заготовки. Остальные параметры обработки на уровень параметра шероховатости влияют незначительно.

С увеличением нормальной силы P при обкатывании и раскатывании параметр Ra уменьшается, но до определенного предела — при оптимальной силе $P_{\text{опт}}$ (рис. 4.70, *a*). При увеличении твердости

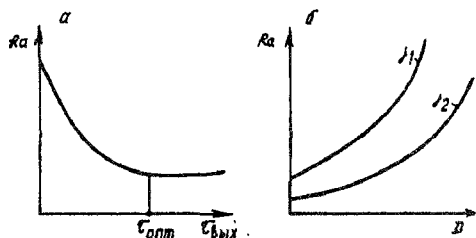


Рис. 4.69. Влияние времени выхаживания $\tau_{\text{вых}}$ (*a*) и дисбаланса шлифовального круга (*б*) на параметр Ra ($j_1 < j_2$)

и снижении пластичности материала заготовки значения $P_{\text{опт}}$ возрастают. Следует, однако, заметить, что, хотя сила P является основным параметром, исходя из которого разрабатываются практические рекомендации по режимам обкатывания, в сущности эффек-

тивность процесса зависит от среднего давления p на поверхности контакта, которое может быть различным при одной и той же силе P (рис. 4.70, б). Оптимальное давление $p_{\text{опт}}$ несколько

возрастает при увеличении твердости материала заготовки. Но если при обкатывании стали 20 оптимальное давление (1,70 кПа) достигается при $P = 650$ Н, то при обкатывании стали У8 оптимальное давление, равное 2 кПа, достигается при $P = 1350$ Н. При обкатывании закаленных сталей, имеющих твердость 58...62 HRC₃, $p_{\text{опт}} = 2,6...2,8$ кПа. Давление p зависит не только от силы P , но и от радиусов кривизны инструмента и заготовки в месте контакта.

Зависимость параметра Ra от числа $N_{\text{прох}}$ проходов с заданным значением P показана на рис. 4.71, а. Увеличение числа проходов сверх оптимального приводит к шелушению поверхности и увеличению шероховатости. Резкое ухудшение поверхности происходит при испытаниях после 25 проходов: появляются многочисленные микротрещины, чешуйки, начинается процесс разрушения (шелушения) подповерхностного слоя.

Изменение подачи s и радиуса r деформирующего элемента существенно влияет на параметр Ra (рис. 4.71, б). Высота микронеровностей прямо пропорциональна подаче во второй степени и обратно пропорциональна радиусу деформирующего элемента (шара). Но в результате наблюдений установлено, что при накатывании существует «граничная» подача, превышение которой существенно влияет на Rz . Эта подача зависит от твердости заготовки. Так, например, при обкатывании высокопрочных сталей шарами диаметром 5...10 мм уменьшение подачи от 0,12 мм/об практически не влияет на Ra , а увеличение подачи сверх этого значения приводит

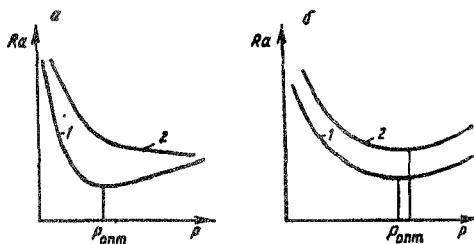


Рис. 4.70. Влияние нормальной силы P (а) и давления p в зоне контакта (б) на параметр Ra при обработке ППД материалов разной твердости: 1 — для HB₁; 2 — для HB₂ (HB₁ < HB₂)

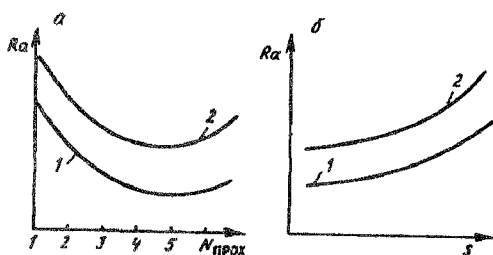


Рис. 4.71. Влияние числа проходов $N_{\text{прох}}$ (а) и продольной подачи s (б) на параметр Ra при обработке ППД материалов разной твердости: 1 — для HB₁; 2 — для HB₂ (HB₁ < HB₂)

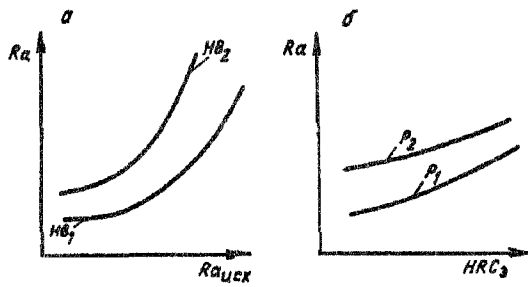


Рис. 4.72. Влияние параметра шероховатости $Ra_{исх}$ исходной поверхности (а) и твердости материала заготовки (б) на Ra при обработке материалов способами ППД: ($HB_1 < HB_2$, $p_1 > p_2$)

к резкому увеличению Ra . При обработке заготовок из отожженных сталей 20 и 15 это граничное значение подачи равно 0,2 мм.

Влияние исходной шероховатости на шероховатость, полученную после обработки способами ППД, показано на рис. 4.72,а. Однако оно начинается только с определенного значения исходного параметра Ra , которое зависит от твердости и пластичности материала заготовки. Например, при обкатывании незакаленных сталей с давлениями, близкими к оптимальным, исходные неровности до $Ra = 3...4$ мкм практически не влияют на значение Ra (0,15...0,2 мкм) после обработки. При давлении ниже оптимального вследствие неполной деформации исходных неровностей их влияние проявляется более резко. То же самое происходит при обкатывании более твердых (улучшенных или закаленных) сталей. В этом случае Ra исходной поверхности начинает влиять при меньших, чем было указано, значениях (рис. 4.72,а кривая HB_2).

Как видно из рис. 4.70...4.72, твердость материала заготовки существенно влияет на параметр Ra . Чем выше твердость, тем хуже обрабатываются способами ППД заготовки, т. е. с увеличением твердости заготовки параметр Ra при прочих равных условиях тоже увеличивается, так как с увеличением твердости понижается пластичность и исходные неровности деформируются менее полно. А по мере увеличения исходных неровностей их деформирование все более затрудняется.

Характер зависимости параметра Ra от условий обработки одинаков и для обкатывания (раскатывания), и для выглаживания. Но алмазное выглаживание обеспечивает получение более ровной и менее шероховатой поверхности (с меньшим значением Ra), чем обкатывание, особенно это проявляется при обработке закаленных сталей.

Результаты обработки способами ППД зависят также от направления пластического деформирования по отношению к направлению предшествующей обработки. Наименьшая шероховатость и более однородная поверхность без местных повреждений образуются при противоположных направлениях рабочих движений на смежных операциях. Так, например, при совпадении направления вращения

расточной борштанги с направлением вращения выглаживающего инструмента во время обработки отверстия в чугунной заготовке были получены значения параметра Ra от 0,18 до 0,5 мкм. А при выглаживании в тех же условиях, но с изменением направления вращения инструмента, значения параметра Ra снизились до 0,1...0,28 мкм. Те же результаты были получены при раскатывании отверстия после его растачивания. Это можно объяснить снижением сопротивления пластическому деформированию после предварительного пластического деформирования противоположного знака.

4.10.3. Влияние способов и условий обработки на состояние подповерхностного слоя материала

Состояние подповерхностного слоя обычно характеризуется двумя сравнительно легко определяемыми показателями: степенью упрочнения N и глубиной (толщиной) упрочненного слоя $h_{сд}$. Степень упрочнения определяется выражением

$$N = 100(H_{уп} - H_{исх})/H_{исх} (\%),$$

где $H_{уп}$ — микротвердость обработанного (упрочненного) материала; $H_{исх}$ — микротвердость исходного материала заготовки.

Эксперименты показали, что с увеличением расстояния h от поверхности микротвердость монотонно уменьшается от $H_{уп}$ до $H_{исх}$ в соответствии с моделью

$$H = H_{исх} + (H_{уп} - H_{исх}) \exp(-kh),$$

где k — параметр, характеризующий темп снижения микротвердости в упрочненном слое.

Влияние скорости резания на степень и глубину упрочнения не является монотонным. Оказалось, что существует оптимальная скорость резания, при которой эти показатели будут минимальными. Увеличение подачи не меняет характера влияния скорости резания на степень и глубину упрочнения, а только уменьшает значение оптимальной скорости резания.

При уменьшении переднего угла от $+15^\circ$ до -15° глубина упрочнения увеличивается почти в 3 раза, а степень упрочнения — на 13 %. Увеличение радиуса скругления режущего лезвия повышает степень и глубину упрочнения при всех подачах, особенно если он больше, чем толщина среза. Существенно влияет на упрочнение увеличение износа инструмента по задней поверхности. Наибольшее влияние на упрочнение оказывает фаска износа на задней грани при скоростях резания, больших или меньших оптимальной. Например, при увеличении фаски износа от 0 до 0,4 мм и оптимальной скорости резания глубина упрочнения увеличивается на 20 мкм, а

степень упрочнения — на 4%. А при обработке со скоростями, меньшими или большими оптимальной, глубина упрочнения возрастает на 55...70 мкм, а степень упрочнения — на 8...10%.

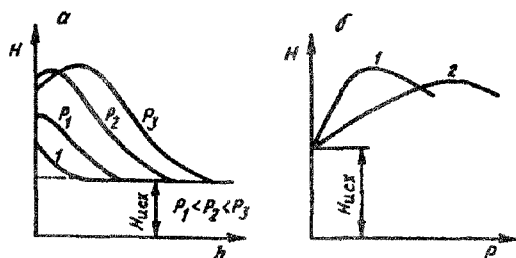
Стали и сплавы, обладая различными прочностными и пластическими свойствами, по-разному упрочняются при обработке резанием. Увеличение относительного удлинения при разрыве (показатель пластичности) существенно увеличивает степень и глубину упрочнения. При многофазной структуре большее упрочнение получают те структурные составляющие, которые более склонны к деформированию и упрочнению.

Марка инструментального материала в широком диапазоне скоростей резания значительно влияет на коэффициент трения на задней поверхности инструмента, а следовательно, на степень и глубину упрочнения. Инструментальный материал, обеспечивающий меньшее значение коэффициента трения, формирует подповерхностный слой детали с меньшей степенью и глубиной упрочнения. Например, поверхность, обработанная резцом из сплава Т14К8, имеет меньшую глубину и степень упрочнения по сравнению с поверхностью, обработанной резцом из сплава ВК8. Это связано с тем, что с увеличением содержания карбидов вольфрама повышается склонность к адгезионному взаимодействию материалов инструмента и заготовки, увеличивается коэффициент трения на задней поверхности.

Формирование подповерхностного слоя у закаленных и незакаленных сталей (чугунов) при шлифовании происходит по-разному. Кратковременные тепловые импульсы при шлифовании незакаленных сталей не могут привести к структурным изменениям в подповерхностном слое, так как не успевают произойти необходимые для этого диффузионные процессы. Процесс стружкообразования при шлифовании сопровождается значительными пластическими деформациями в подповерхностном слое, что способствует упрочнению. Однако высокие температуры в зоне резания вызывают разупрочнение материала, и его наклеп при этом снижается.

Особенностью формирования подповерхностного слоя при шлифовании закаленной стали является то, что ее структура может изменяться под действием даже кратковременных тепловых импульсов, так как при этом в основном происходят бездиффузионные процессы (переход $\alpha \rightarrow \gamma$), а распад твердых растворов требует значительно меньших тепловых затрат, чем их образование. При низкой производительности процесса и нормальной (30 м/с) или пониженной скорости шлифования подповерхностный слой упрочняется (наклепывается) так же, как у незакаленных сталей. При повышении производительности и недостаточном охлаждении происходит отпуск мартенсита (прижог отпуска) и микротвердость

Рис. 4.73. Зависимость степени и глубины (толщины слоя) упрочнения от условий обработки способами ППД



материала становится ниже исходной. При дальнейшем повышении производительности и обильном охлаждении наблюдается вторичная закалка (прижог закалки). Быстрое охлаждение поверхности, выходящей из зоны шлифования, формирует аустенитно-мартенситную структуру. Слой вторичной закалки при этом имеет высокую микротвердость (выше микротвердости мартенсита), хотя и может содержать до 60...70% аустенита. Это обусловлено мелкодисперсной структурой аустенита и его упрочнением. Обычно под вторично закаленным слоем находится слой с пониженной микротвердостью. При значительной производительности и недостаточном охлаждении может наблюдаться отпуск вторично закаленного слоя.

При выхаживании производительность процесса шлифования непрерывно уменьшается, что приводит к некоторому увеличению степени упрочнения. Оптимальное время выхаживания для получения поверхности с достаточно малой шероховатостью и достаточным упрочнением материала при врезном шлифовании составляет 8...12 с.

Обработка способами ППД вызывает в подповерхностном слое значительно большее упрочнение, чем обработка резанием (кривая 1 на рис. 4.73,а). Глубина упрочненного слоя также значительно больше. С увеличением силы P , с которой рабочее тело (шар, ролик, алмазный наконечник) прижимается к обрабатываемой поверхности, возрастает как степень, так и глубина (толщина слоя) упрочнения (рис. 4.73,а). Однако такая связь имеет место только до определенного предела. В каждом конкретном случае существует предельное значение силы P , превышение которого приводит не к повышению, а к понижению микротвердости обработанного материала (рис. 4.73,б). При алмазном выглаживании максимальное повышение твердости выше и достигается при значительно меньших значениях нормальной силы, чем при обкатывании шарами. На рис. 4.73,б алмазному выглаживанию соответствует кривая 1, а обкатыванию шаром — 2. Радиус сферы деформирующего инструмента в обоих случаях был один и тот же.

С увеличением диаметра рабочего элемента выглаживающего (накатывающего) инструмента снижается максимально достижимая степень упрочнения и существенно повышается необходимое для ее достижения значение нормальной силы. Это предельное значение

нормальной силы зависит от механических свойств обрабатываемого материала. У мягких и пластичных материалов и сплавов оно меньше, чем у более твердых и менее пластичных. Так, например, у армко-железа прирост твердости прекращается при значениях P , больших 0,5 кН, а у сталей 20, 45 и У8 — соответственно при значениях 1; 1,8 и 2 кН. Прирост твердости поверхности, обработанной способами ППД, существенно зависит от структуры материала заготовки. Минимальный прирост твердости наблюдается при обработке сорбита и троостита, а максимальный — ферритно-перлитной структуры.

Высокую склонность к упрочнению при выглаживании обнаруживают аустенитные стали, особенно при предварительном охлаждении заготовок до -70°C . Это связано с тем, что при пластическом деформировании аустенитных сталей происходит не только упрочнение аустенита, но и аустенитно-мартенситное фазовое превращение. Деформация мартенситной структуры сопровождается интенсивным дисперсионным твердением и превращением остаточного аустенита в мартенсит.

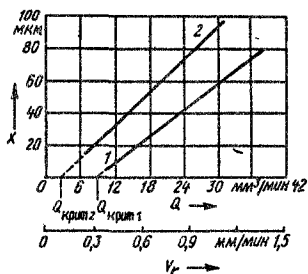
Изменение подачи и скорости в пределах, рекомендуемых для обкатывания и алмазного выглаживания, практически не влияет на глубину и степень упрочнения. Увеличение числа проходов при обкатывании или выглаживании с оптимальным значением нормальной силы практически не увеличивает твердость обработанного материала. Но если давление ниже оптимального, то повторные проходы (до определенного числа) повышают твердость. При этом допустимое, с точки зрения упрочнения, число проходов тем больше, чем меньше оптимального значения значения силы P . А если рабочее значение нормальной силы больше оптимального, то дополнительные проходы ведут к уменьшению твердости обработанной поверхности.

4.10.4. Управление качеством поверхности при шлифовании

Экспериментальные исследования показали, что глубина структурно измененного слоя (прижогов) при шлифовании закаленной стали при прочих равных условиях приблизительно линейно зависит от объемной производительности процесса шлифования (или от параметров, функционально связанных с ней). Один из примеров такой зависимости при круглом врезном шлифовании образцов из стали ШХ15 кругом 24А40СМ2К5 со скоростью шлифования $v_k = 35$ м/с и скоростью вращения заготовки $v_3 = 135$ м/мин показан на рис. 4.74. Круг считается «острым» непосредственно после его правки. Объемная производительность Q связана со скоростью v_r уменьшения радиуса заготовки известным выражением

$$Q = \pi D_3 B v_r ,$$

Рис. 4.74. Зависимость глубины (толщины) дефектного слоя (прижогов) от интенсивности удаления материала заготовки при шлифовании «острым» (1) и «затупленным» (2) кругами



где D_3, B — соответственно диаметр и ширина заготовки.

Анализ графиков на рис. 4.74 позволяет сделать следующие выводы: 1) в каждом конкретном случае существует критическая производительность $Q_{крит}$, при которой не образуется прижогов; 2) по мере изнашивания и затупления шлифовального круга значения $Q_{крит}$ уменьшаются, а глубина (толщина) дефектного слоя (прижогов) увеличивается; 3) зависимость между глубиной прижогов X и параметрами производительности съема припуска можно отразить следующей моделью:

$$X = K_d(Q - Q_{крит}) \quad \text{при } Q > Q_{крит};$$

$$X = 0 \quad \text{при } Q \leq Q_{крит}$$

или

$$X = \pi D_3 B K_d (v_r - v_{r крит}), \quad (4.19)$$

где K_d — коэффициент дефекта.

Чтобы в подповерхностном слое шлифованной детали не было структурных изменений, необходимо либо шлифовать с интенсивностью съема припуска ниже критической (но в этом случае сильно снижается производительность), либо так изменять параметры режима шлифования, чтобы в любой момент времени глубина X прижога была меньше припуска Π , который еще остался, т. е. $X \leq \Pi$. Если подставить это неравенство в модель (4.19), получим

$$Q \geq Q_{крит} + \Pi / K_d.$$

Данное выражение можно назвать тепловым ограничением производительности процесса шлифования.

При управлении процессом шлифования необходимо, кроме теплового, учитывать и силовое ограничение производительности. На начальных этапах рабочего цикла съема припуска силовое ограничение определяется допустимой (с точки зрения получаемой на

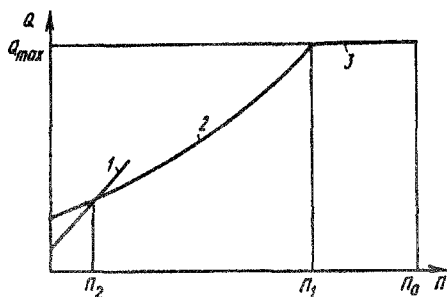


Рис. 4.75. Схема ограничений (1,3 — силового; 2 — теплового) производительности Q при шлифовании

обеспечения требуемого значения параметра шероховатости. Схема ограничений производительности при шлифовании показана на рис. 4.75, где P_0 — исходный припуск, P_1 и P_2 — значения припуска, при которых пересекаются линии теплового и силовых ограничений. В общем случае эти линии в пределах P_0 могут и не пересекаться. Тогда производительность ограничивается только тепловыми процессами в зоне шлифования.

Часть времени шлифования, непосредственно связанную со съемом припуска, будем называть *рабочим циклом* шлифования. Он может быть разбит на ряд последовательных этапов, каждый из которых выполняет определенную функцию (предварительное шлифование, чистовое, выхаживание). *Алгоритмом управления съемом припуска* будем называть программу изменения скорости одного или нескольких рабочих движений за время рабочего цикла в соответствии с функцией выполняемого этапа. Целью управления съемом припуска является минимизация затрат времени и (или) денег на его реализацию при обязательном обеспечении требований к качеству шлифованной поверхности и подповерхностного слоя. Программа изменения скорости рабочих движений может быть задана как функция той части припуска, которую осталось снять, или как функция времени. При определении параметров любого алгоритма съема припуска необходимо обязательно учитывать ограничения производительности.

Наиболее часто на практике применяется ступенчатый алгоритм управления съемом припуска по каналу (СтАЛП), который состоит из ряда подач, последовательно уменьшающихся от начала рабочего цикла к его концу (см. рис. 2.24). Согласование параметров рабочего цикла с тепловыми ограничениями для СтАЛП является сложной задачей, так как сводится к решению системы трансцендентных уравнений, и может быть выполнено только с помощью ЭВМ.

этом этапе погрешности формы или относительного расположения) упругой деформацией технологической системы (следовательно, значением радиальной силы P_y). В некоторых случаях силовое ограничение выбирается из условия сохранения режима работы круга (например, частичного самозатачивания). На последнем этапе рабочего цикла силовое ограничение может быть получено из условия

Наиболее эффективным является *граничный алгоритм управления съемом припуска по каналу радиальной подачи* (ГрАЛП), в котором подача изменяется так, чтобы скорость v_r уменьшения радиуса заготовки (или глубина шлифования) в любой момент шлифования соответствовала требованиям силового и теплового ограничений. Использование ГрАЛП снижает время съема припуска на 10...80% по сравнению со СтАЛП, который согласован с ограничениями производительности. Причем чем выше жесткость технологической системы и коэффициент режущей способности $K_{реж}$, тем эффективнее ГрАЛП по сравнению со СтАЛП.

Для реализации ГрАЛП используется система автоматического управления на базе микроЭВМ. Схема такой системы приведена на рис. 4.76. В процессе круглого шлифования заготовки 1 кругом 2 с помощью прибора активного контроля ДП (датчика припуска) непрерывно фиксируется изменение диаметра заготовки. Одновременно измеряется упругая деформация y одного из элементов технологической системы. Эта деформация пропорциональна радиальной силе шлифования P_y . Задающее устройство (ЗУ) формирует сигналы (уставки), пропорциональные заданным значениям параметров k , Q_{max} , $Q_{крит}$, K_d , где k — коэффициент пропорциональности между фактической производительностью и упругой деформацией; Q_{max} — максимальная, согласно силовому ограничению, производительность. Все эти сигналы, а также сигналы от ДП и D_y поступают в счетно-логическое устройство (СЛУ), которое формирует сигнал, пропорциональный требуемой ограничением подаче, и передает его в исполнительное устройство (ИСУ) для отработки.

Схема алгоритма работы СЛУ показана на рис. 4.77,а. На рис. 4.77,б дана упрощенная схема ограничений производительности шлифования. Пока не снят весь припуск ($\Pi > 0$), сигналы от D_y и ДП через аналогово-цифровые преобразователи АЦП1 и АЦП2 передаются с определенной частотой в вычислительное устройство, которое вычисляет значения фактической (Q_2) и допустимой тепловым ограничением (Q_1) производительности, сравнивает их между собой и с Q_{max} и, в зависимости от результатов, изменяет на дискрету Δs текущее значение подачи. Когда припуск Π становится

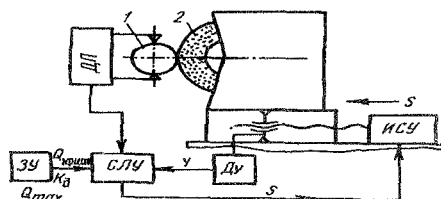


Рис. 4.76. Система автоматического управления циклом съема припуска при круглом врезном шлифовании

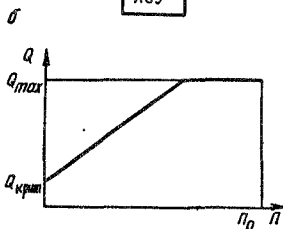
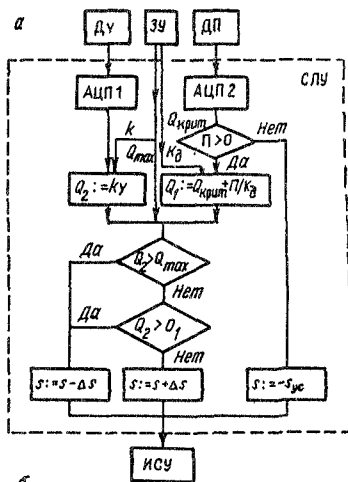
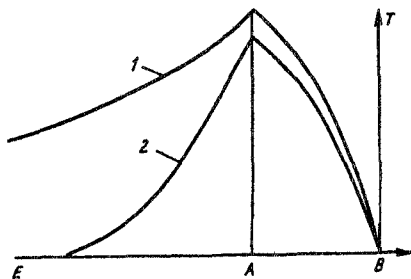


Рис. 4.77. Схема (а) алгоритма работы СЛУ системы автоматического управления циклом съема припуска согласно ограничениям (б) при круглом врезном шлифовании

тем меньше СОЖ попадает в зону шлифования. При скоростном шлифовании, когда $v_k \geq 50 \dots 70$ м/с, процесс резания протекает практически всухую.

На рис. 4.79 показан способ подачи СОЖ, обеспечивающий ее проникновение в зону контакта круга 4 со шлифуемой заготов-



равным нулю, включается ускоренный отвод бабки шлифовального круга (подача s_{yc}).

Чтобы повысить эффективность систем управления съемом припуска, необходимо создать условия шлифования, существенно повышающие параметры ограничений производительности. Главным является снижение температуры в зоне шлифования. Обычное охлаждение поливом почти не уменьшает максимальную температуру в зоне шлифования (рис. 4.78). Оно уменьшает теплосодержание шлифуемой заготовки в целом за счет быстрого охлаждения за пределами зоны шлифования. Такая низкая эффективность охлаждения поливом объясняется влиянием воздушных потоков, которые образуются быстро вращающимся пористым шлифовальным кругом. Эти потоки создают вблизи зоны шлифования область повышенного давления, и падающая струя СОЖ практически не проникает в зону резания. Чем больше скорость вращения круга v_k ,

Рис. 4.78. Изменение температуры T в зоне шлифования (А—В) и на шлифованной поверхности (А—Е) при шлифовании без охлаждения (кривая 1) и с охлаждением (кривая 2)

кой 3. Часть СОЖ подается через сопло 2 как обычно, свободно падающей струей, а часть — в промежутке между кожухом 1 и рабочей поверхностью круга. Здесь СОЖ, разгоняясь за счет трения о круг, попадает в клиновую часть (E) устройства, где вследствие перехода кинетической энергии струи в потенциальную резко повышается давление, за счет которого СОЖ «задавливается» в подповерхностные слои круга. Из этих слоев СОЖ под действием центробежных сил попадает в зону шлифования, как это указано стрелками. Испытания показали, что данный способ подачи СОЖ по сравнению с обычным обеспечивает почти двукратное снижение объемного износа круга и более чем двадцатикратное повышение съема металла за период стойкости круга. При этом прижогов не наблюдается.

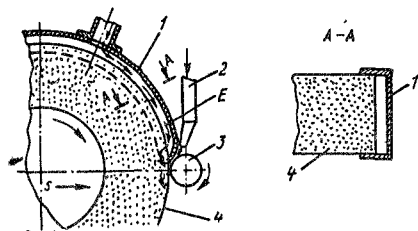


Рис. 4.79. Схема комбинированной подачи СОЖ при круглом шлифовании

Достаточно эффективным оказался способ подачи СОЖ, показанный на рис. 4.80,а. В данном случае подача СОЖ свободно падающей струей из сопла 3 сочетается с вынесенной за пределы зоны шлифования (сдвиг фазы на угол β) гидроочисткой круга высоконапорной струей СОЖ из размещенного в кожухе 2 сопла 1, которое может быть неподвижным многоканальным (рис. 4.80,б) или подвижным одноканальным (рис. 4.80,в). Расход СОЖ через неподвижное многоканальное сопло увеличивается пропорционально ширине круга, что требует соответствующего повышения мощности насосной станции. Поэтому использовать такое сопло при шлифовании широкими кругами затруднительно, а иногда и невозможно. В этих случаях целесообразно применять подвижное сопло, либо

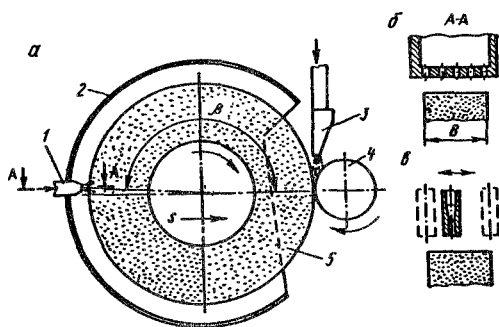


Рис. 4.80. Схема подачи СОЖ со струйно-напорной очисткой круга:

1, 3 — сопла; 2 — кожух; 4 — заготовка; 5 — шлифовальный круг

движущееся возвратно-поступательно, либо качающееся, либо вращающееся. Испытания подачи СОЖ со струйно-напорной очисткой показали, что при этом: 1) в 1,15...2,47 раза увеличивается коэффициент режущей способности шлифовального круга ($K_{\text{реж}}$); 2) наибольший эффект увеличения $K_{\text{реж}}$ имеет место при шлифовании сталей и сплавов, склонных к адгезии с материалом абразивных зерен (эффект засаливания); 3) наибольший эффект увеличения $K_{\text{реж}}$ имеет место при чистовом шлифовании и при использовании в качестве СОЖ смеси сульфозрезола (90%) и дизельного топлива; 4) существенно увеличивается период стойкости круга; 5) повышается точность формы шлифованной поверхности в продольном и поперечном сечениях.

Существенное снижение теплонапряженности процесса может быть достигнуто, если шлифование осуществлять кругом с прерывистой рабочей поверхностью (рис. 4.81). Для этого на рабочей поверхности круга предварительно формируют тем или иным способом канавки, направленные параллельно оси круга или под углом β (для уменьшения уровня вибраций). Если дно спиральной канавки расположено не на цилиндре, а на конусе, то круг, работая как диагональный вентилятор, будет под давлением прогонять СОЖ, подаваемую путем свободного полива к его торцу, в зону шлифования. Прокачка СОЖ через прорезы круга обусловлена в данном случае действием кориолисовых сил инерции. Характер изменения температуры в зоне сплошного и прерывистого шлифования иллюстрируется графиками, приведенными на рис. 4.82. Эксперименты показали, что максимальная температура $T_{\text{пер}}$ при шлифовании прерывистым кругом в два и более раз ниже, чем температура $T_{\text{спл}}$ при шлифовании сплошным кругом. Оптимальная длина выступов (l_1 на рис. 4.81), при которой достигается максимальное снижение температуры, как показали эксперименты, составляет 10...40 мм. При этом длину впадины l_2 из соображений сохранения достаточно высокой износостойкости круга следует выбирать соглас-

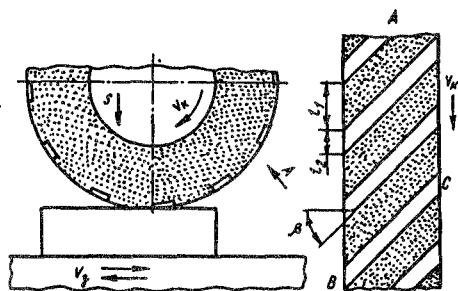
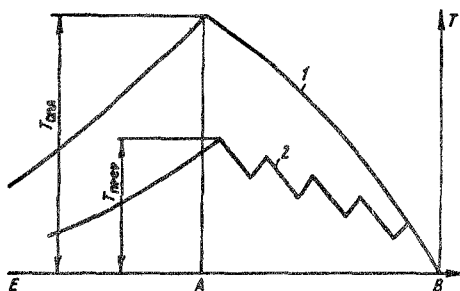


Рис. 4.81. Схема плоского шлифования кругом с прерывистой рабочей поверхностью

Рис. 4.82. Изменение температуры в зоне шлифования при обработке сплошным (кривая 1) и прерывистым (кривая 2) кругами



но равенству $l_2 = (0,3...0,5)l_1$.

С увеличением скорости v_3 перемещения заготовки длина выступа l_1 должна уменьшаться. Так, согласно расчетам, при изменении скорости заготовки от 10 до 15 м/мин длину выступа следует уменьшить с 34 до 23 мм. При этом уровень уменьшения температуры $T_{\text{пер}}$ сохранится.

Круги с прерывистой рабочей поверхностью сохраняют длительное время хорошую режущую способность. Так, в интервале 30-минутного шлифования заготовок из стали 12Х12Н4А сплошным кругом коэффициент режущей способности уменьшился более чем в 2 раза, а при шлифовании прерывистым кругом его значение практически не изменилось. А сразу после правки круга значения $K_{\text{реж}}$ для прерывистого круга были на 20...30% больше, чем для сплошного.

Прерывистые круги, пазы которых заполнены твердой смазкой, а также круги, имеющие на рабочей поверхности периодически чередующиеся участки с различной твердостью, называют *композиционными*. Испытание опытной партии кругов с графитовыми вставками показало, что максимальная температура в зоне шлифования уменьшилась на 30...40%. А при испытании кругов, имеющих по четыре режущих сектора твердостью СМ2 и ВМ2, установлено, что такая конструкция круга снижает максимальную температуру в зоне шлифования на 15...20% по сравнению со сплошным кругом твердостью СМ2.

4.11. Влияние вибраций на процесс и результаты обработки

4.11.1. Источники вибраций при лезвийной обработке резанием и шлифовании

Вибрации, возникающие во время обработки (т. е. между инструментом и заготовкой), а также во время холостых перемещений и позиционирования, в зависимости от вызывающих эти вибрации причин можно разбить на два класса. К первому относят

вынужденные колебания, которые вызываются и поддерживаются энергетическим источником периодического характера. Таким источником может быть процесс резания, например при фрезеровании и протягивании, когда периодически изменяется суммарное сечение среза (а значит, и сила резания), или при точении с переменной глубиной резания (см. рис. 4.36), когда ось вращения и ось симметрии заготовки не совпадают. К первому классу относятся также вибрации, вызванные дисбалансом быстровращающихся элементов рассматриваемой технологической системы или передаваемые через опоры от другого технологического оборудования.

Частота вынужденных колебаний равна частоте вынуждающей силы, а их амплитуда зависит от динамической жесткости технологической системы (см. рис. 4.37). Обычно технологическая система имеет не одну, а несколько частот собственных колебаний, поэтому частотная характеристика динамической жесткости имеет не один, а несколько минимумов.

Вибрации в технологической системе могут возникнуть и при отсутствии явной (внешней) вынуждающей периодической силы. Причем в отличие от свободных колебаний эти вибрации могут быть незатухающими и при наличии диссипативных (рассеивающих энергию, демпфирующих) сил. Такие вибрации называют *автоколебаниями* и относят ко второму классу. При автоколебаниях источник энергии, восполняющий ее потерю, связанную с работой диссипативных сил, по своей природе не является периодическим. Переменная сила, поддерживающая колебательное движение, создается самой замкнутой движущейся системой за счет ее внутренних связей и при прекращении процесса резания (или движения) исчезает.

Можно выделить следующие виды внутренних связей в технологической системе: координатные, скоростные и инерционные. *Координатная связь* проявляется в том, что связанное с какой-либо причиной перемещение в определенном направлении вызывает также перемещения вдоль других осей. *Скоростная связь* возникает в тех случаях, когда в системе действуют силы, являющиеся функциями скорости (силы резания и трения). Она проявляется, когда их изменение по одной координате вызывает изменение сил по другой. *Инерционная (или динамическая) связь* возникает в технологической системе при наличии в ней нескольких упруго связанных масс и в тех случаях, когда равнодействующая сил инерции не проходит через центр жесткости системы. В таких случаях одновременно с прямолинейным смещением происходит угловое, вызванное моментом сил инерции относительно центра масс.

Возбуждение автоколебаний или потеря устойчивости процесса

обработки (а также холостых движений) обуславливается следующими причинами: 1) нелинейной зависимостью силы резания (и трения) от скорости; 2) запаздыванием силы по сравнению с перемещением; 3) влиянием внутренних (координатных, скоростных и инерционных) связей; 4) вторичным возбуждением

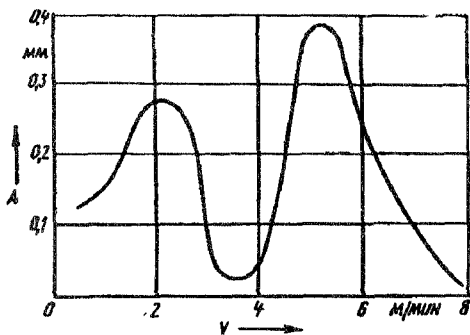


Рис. 4.83. Зависимость амплитуды продольных автоколебаний стола с механическим приводом от скорости его движения (без резания)

от волнистости, образующейся на поверхности резания (заготовки) или рабочей поверхности шлифовального круга. В большинстве случаев наблюдается одновременное влияние нескольких из перечисленных причин, причем одна из них обычно доминирует, т. е. оказывает наибольшее влияние.

Частота автоколебаний (как и при свободных колебаниях) определяется частотой собственных колебаний системы. Для систем с несколькими степенями свободы возможны автоколебания на разных частотах: низкочастотные, соответствующие основной (минимальной) частоте собственных колебаний, и высокочастотные, когда устойчивость теряет элемент с высокой частотой собственных колебаний. Амплитуда автоколебаний зависит от многих факторов.

На рис. 4.83 показана зависимость амплитуды A продольных автоколебаний стола с механическим (винтовым) приводом от скорости v его движения. Экспериментами установлено, что при потере устойчивости в данной системе, не подвергающейся действию сил резания, возникают автоколебания, складывающиеся из колебаний в направлении заданного движения и в направлении, перпендикулярном к плоскости скольжения. Соотношение амплитуд колебаний по этим направлениям составляет примерно 400:1. Установлено, что при некоторой скорости, зависящей от других параметров системы, начинается уменьшение амплитуды автоколебаний и после минимума может при дальнейшем увеличении скорости стола появиться новый максимум амплитуды. Между этими максимумами может быть область скоростей с отсутствием автоколебаний, т. е. устойчивого движения. При скорости v , большей 8...10 м/мин, движение стола становится устойчивым.

Эксперименты показали, что увеличение жесткости привода и вязкости смазочного материала уменьшает амплитуду автоколебаний. А разгрузка направляющих путем подачи смазочного материала

под давлением (до 0,15 МПа) уменьшает области скоростей неустойчивого движения и амплитуду колебаний в этих областях. Замена механического привода стола гидравлическим устраняет вторую (по скорости движения) область существования автоколебаний, а первая область при этом сокращается до скоростей, меньших 0,2 м/мин. Максимальный уровень амплитуды автоколебаний стола с гидравлическим приводом оказался в 2 раза ниже, чем стола с механическим приводом.

Эксперименты показали, что при точении частота автоколебаний слабо зависит от показателей режима резания, а определяется главным образом основной частотой собственных колебаний технологической системы. Амплитуда автоколебаний при точении существенно зависит от условий обработки. Увеличение ширины среза (глубины резания) ведет к резкому увеличению амплитуды автоколебаний. Такое влияние ширины среза снижается при увеличении его толщины (подачи). При подачах, больших 0,6...0,8 мм/об, увеличение или уменьшение ширины среза практически не влияет на амплитуду автоколебаний.

Установлено, что существует скорость резания (35...50 м/мин), при которой амплитуда автоколебаний при точении достигает максимума. Ширина зоны скоростей, оказывающих существенное влияние на амплитуду автоколебаний, зависит от переднего угла резца и уменьшается с его увеличением. При этом уменьшается также максимальное значение амплитуды автоколебаний. Кроме того, установлено, что уменьшение главного угла в плане, увеличение радиуса скругления вершины резца и уменьшение жесткости технологической системы увеличивают амплитуду автоколебаний. Уменьшение заднего угла от 16° до 3° также не оказывает влияния на интенсивность автоколебаний. Однако при уменьшении заднего угла от 3° до 2° амплитуда автоколебаний увеличивается.

Эксперименты также показали, что, кроме рассмотренных выше относительно низкочастотных автоколебаний, при растачивании возникают высокочастотные, амплитуда которых зависит от глубины и скорости резания так же, как и амплитуда низкочастотных автоколебаний. Но характер влияния переднего и заднего углов расточного резца на амплитуду высокочастотных колебаний совсем не такой, как на интенсивность низкочастотных. В данном случае наблюдается оптимальное значение этих углов, при которых амплитуда автоколебаний либо равна нулю, либо минимальна при данной скорости резания. Если затупление резца обычно снижает амплитуду низкочастотных колебаний, то с увеличением износа резца по задней грани амплитуда высокочастотных автоколебаний увеличивается.

При круглом шлифовании с продольной подачей при увеличении скорости вращения заготовки амплитуда автоколебаний увеличивается тем в большей степени, чем меньше продольная подача и глубина шлифования. При круглом шлифовании, как показали эксперименты, частота автоколебаний зависит от их амплитуды. Так, при частоте собственных колебаний заготовки 352 Гц с увеличением амплитуды автоколебаний от 5 до 15 мкм их частота понижается с 600 до 400 Гц.

При врезном круглом шлифовании также было замечено увеличение амплитуды автоколебаний с 1 до 20 мкм, если скорость вращения заготовки увеличивается от 30 до 100 м/мин. Интенсивность автоколебаний возрастает при увеличении ширины шлифования и уменьшается при увеличении радиальной подачи.

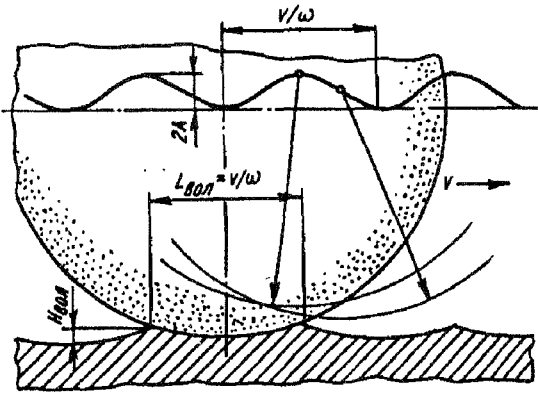
При круглом шлифовании процесс высокочастотных автоколебаний обусловлен вторичным возбуждением, суть которого заключается в образовании волнистости на рабочей поверхности шлифовального круга благодаря его неравномерному радиальному износу. Скорость увеличения интенсивности автоколебаний в данном случае зависит от твердости круга (всегда существует оптимальная), от радиальной подачи и скорости шлифования. С увеличением радиальной подачи и уменьшением скорости шлифования растет средняя скорость радиального изнашивания, а значит, и скорость нарастания амплитуды высокочастотных автоколебаний.

Обычно в технологической системе наблюдаются оба класса источников вибраций. В зависимости от разности между частотой вынуждающей силы и частотами собственных колебаний могут существовать три вида колебательных движений. Если частота вынуждающей силы близка к собственной частоте, то в системе устанавливается режим гармонической синхронизации. В этом случае частота колебаний системы равна частоте вынуждающей силы. При средней разности между указанными частотами в системе имеет место квазипериодическое движение — режим биений. В случае большой разности указанных частот в системе имеет место автоколебательное движение.

4.11.2. Борьба с вибрациями при обработке на станках

Вибрации обычно ограничивают возможность повышения производительности обработки, точности и качества обработанных поверхностей. Они создают дополнительные динамические нагрузки, часто снижающие стойкость инструмента и долговечность станка. Автоколебания в системе подачи станка обычно снижают точность

Рис. 4.84. Схема формирования волнистости при шлифовании ($L_{\text{вол}}$ — длина волны; v — скорость относительного перемещения круга; ω — частота вынуждающей силы)



позиционирования (выход суппорта или стола на заданный размер), что особенно нежелательно при обработке на станках с ЧПУ. Вибрации при обработке резанием увеличивают шероховатость обработанной поверхности и приводят к появлению волнистости!

При обработке цилиндрической фрезой или шлифовальным кругом часто формы кривых профиля волнистой поверхности и траектории относительного перемещения инструмента и заготовки существенно различаются (рис. 4.84). Увеличение амплитуды $2A$ относительных колебаний инструмента и заготовки в таких случаях еще не означает увеличения высоты $H_{\text{вол}}$ волны на обработанной поверхности. Причиной этого явления считается процесс «самоперерезания» волн. Этот процесс начинается при тем большей амплитуде колебаний, чем меньше ее частота. При постоянной частоте колебаний «самоперерезание» волн наступает при тем меньшей скорости стола, чем меньше амплитуда относительных колебаний инструмента и заготовки.

Для ослабления вынужденных колебаний станка, передаваемых через фундамент от внешних источников, станок необходимо удалить от них на достаточное расстояние и (или) установить на виброизолирующие устройства (резинометаллические опоры, виброизолирующие коврики и т. д.). Зависимость амплитуды колебаний фундамента $A_{\text{фун}}$ рассматриваемого станка от амплитуды колебаний $A_{\text{ис}}$ внешнего источника отражается следующей экспериментальной моделью:

$$A_{\text{фун}} = A_{\text{ис}} \exp(-0,146L),$$

где L — расстояние от внешнего источника колебаний, м.

Наиболее существенной частью любого виброзащитного устройства является упругий элемент, обладающий достаточной податливостью и способный служить механическим фильтром низких частот. Широко распространены резинометаллические виброзащитные устройства (амортизаторы) различной конструкции, в которых резиновый упругий элемент привулканизирован к металлическим деталям крепления. Недостатком резиновых упругих элементов является их «старение» под действием температуры окружающей среды, влажности и кислорода воздуха. В настоящее время получили распространение демпфируемые амортизаторы, снабженные специальными устройствами для рассеяния энергии колебаний — демпферами (воздушными, гидравлическими или сухого трения).

Для снижения вибраций, вызванных работой собственных механизмов и приводов станка, необходима тщательная балансировка быстровращающихся валов, шпинделей и двигателей. Хорошие результаты дает установка двигателей на виброизолирующие резиновые прокладки (амплитуда вибраций от таких двигателей уменьшается в 2...3 раза). Особенно важной является балансировка шлифовальных кругов, так как они в состоянии поставки имеют существенный дисбаланс, фаза и значение которого изменяются в процессе эксплуатации. Поэтому на прецизионных шлифовальных станках балансировка шлифовальных кругов производится не только после сборки с фланцами перед установкой на станок, но и периодически в процессе эксплуатации. Для такой балансировки разработано множество балансирующих устройств.

Одним из методов борьбы с автоколебаниями является выбор таких условий работы станка, при которых процесс позиционирования его узлов и процесс резания устойчивы. На рис. 4.85 показана зависимость области устойчивости движения стола станка, не нагруженного силами резания, от скорости v движения, жесткости j привода и нагрузки на направляющие (массы стола). Из графиков на этом рисунке видно, что увеличение жесткости привода уменьшает область скоростей скольжения, где движение неустойчиво.

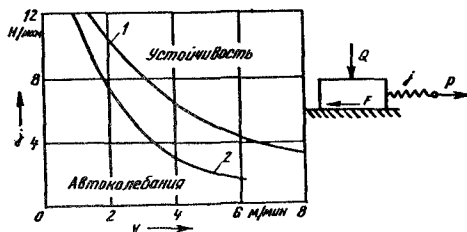


Рис. 4.85. Область устойчивости движения стола в параметрах скорость v — жесткость j привода:
1 — масса стола 860 кг; 2 — масса 620 кг

Увеличение нагрузки на направляющие (увеличение массы стола) для устойчивого движения требует повышения жесткости привода.

Для повышения плавности перемещения элементов станков рекомендуется: 1) исключать скорости скольжения и контактные давления, при которых возникает «схватывание»; 2) уменьшать коэффициент трения за счет использования соответствующих материалов пары трения и смазывания; 3) устранять непосредственный контакт трущихся поверхностей при движении и в относительном покое путем использования аэро- и гидравлических устройств в направляющих; 4) повышать жесткость привода стола без уменьшения демпфирующей способности; 5) совмещать векторы равнодействующих сил трения и упругих сил привода. Большая часть приведенных рекомендаций может быть использована при модернизации существующих или проектировании специальных станков, а также сложных приспособлений.

На рис. 4.86...4.89 дано расположение областей устойчивости в зависимости от параметров и условий течения и фрезерования. Графики зависимости ширины b и толщины c среза на рис. 4.86, *a* показывают, что при точении на токарном станке выйти из области автоколебаний можно либо за счет уменьшения ширины b , либо за счет увеличения толщины среза c . Увеличение частот ω_{01} , ω_{02} , ω_{03} собственных колебаний системы закрепления заготовки (за счет увеличения жесткости или уменьшения массы) расширяет область устойчивости процесса течения. Согласно графикам зависимости b от скорости v на рис. 4.86, *б*, выход из зоны автоколебаний

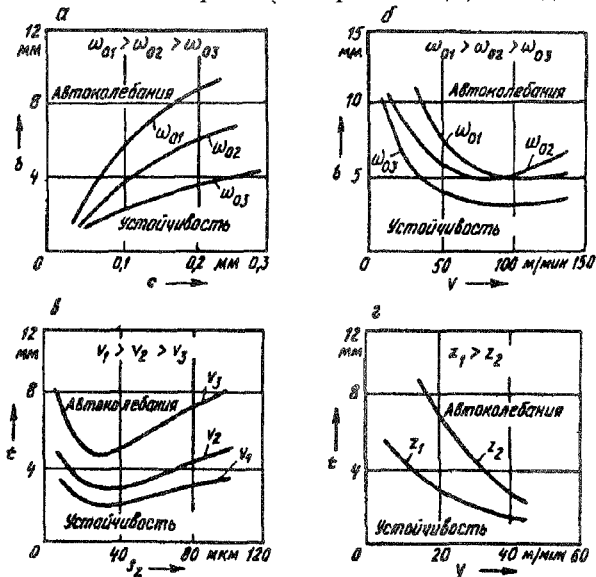


Рис. 4.86. Области устойчивости процесса резания при точении и фрезеровании

Рис. 4.87. Области устойчивости процесса резания при фрезеровании

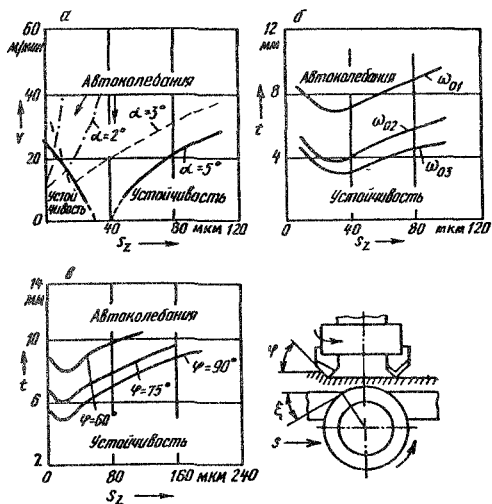


Рис. 4.88. Зависимость устойчивости процесса точения (а) и растачивания (б) на токарном станке от ориентации силы резания

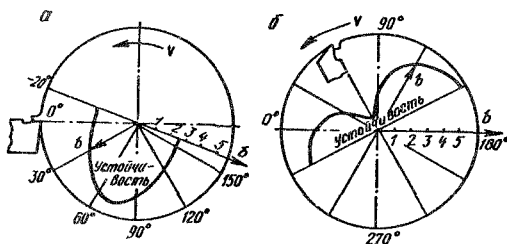
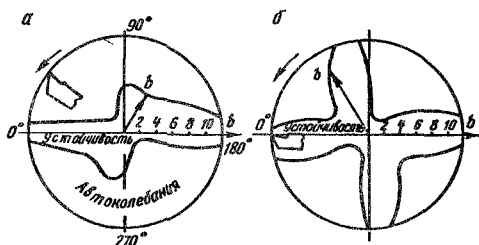


Рис. 4.89 Зависимость устойчивости процесса растачивания от ориентации силы резания и оси эллипса жесткости оправки



возможен как при увеличении, так и при уменьшении скорости резания, а также при уменьшении ширины среза. Увеличение частот собственных колебаний системы крепления заготовки и в данных экспериментах в основном расширяет зону устойчивого течения.

Графики зависимости глубины t резания от подачи s_z , приведенные на рис. 4.86, в, показывают, что увеличение скорости резания v (с 14 до 35 м/мин) понижает границу устойчивости процесса фрезерования быстрорежущей торцовой фрезой. Выход из зоны автоколебаний возможен либо при увеличении, либо при уменьшении подачи на зуб s_z , а также при уменьшении глубины t фрезерования. Снижение границы устойчивости при повышении скорости v резания видно также на рис. 4.86, г. Существенно понижаются границы устойчивого фрезерования при увеличении числа зубьев фрезы z (соответственно числа зубьев, одновременно находящихся в зоне резания). Уменьшение заднего угла α значительно сужает область автоколебаний при фрезеровании (рис. 4.87, а). А уменьшение частоты ω_0 собственных колебаний системы «шпиндель—фреза», которая изменялась путем крепления к фрезе дополнительного маховика, понижает границу устойчивого фрезерования (рис. 4.87, б). Аналогичное явление имеет место при уменьшении жесткости крепления фрезы к шпинделю.

Эксперименты показали, что устойчивость процесса резания зависит от ориентации силы резания относительно осей эллипса жесткости технологической системы. Ориентация силы резания изменялась за счет изменения угла в плане φ и угла входа ξ (рис. 4.87, в). Уменьшение угла φ повышает границу устойчивости. При опытах с углом в плане 45° и 30° автоколебания не возникали во всем диапазоне применявшихся значений глубины t фрезерования и подачи s_z . При фрезеровании с продольной подачей увеличение угла врезания увеличивает граничную глубину резания, а при фрезеровании с поперечной подачей — наоборот, уменьшает.

Опыты, проведенные на токарном станке со специальным резцедержателем, который позволял изменять угловое положение резца, показали, что предельная ширина среза течения существенно зависит от направления силы резания (рис. 4.88, а). Как можно видеть, автоколебания возникают при минимальной ширине b среза, когда резец находится в положении, обозначенном -20° и 160° , и при максимальной ширине среза, когда резец находится в положении, обозначенном 70° . Эти опыты показали, что нормальное положение резца почти совпадает с наименее благоприятной его ориентацией и что изменением ориентации можно было бы повысить предельную глубину резания t почти в 2 раза.

Зависимость устойчивости (максимальной ширины среза) от ориентации резца при растачивании отверстий на токарном станке

показана на рис. 4.88,б. Резец закреплялся в цилиндрической борштанге диаметром 55 мм и длиной 350 мм. Минимальная предельная ширина среза соответствует положению резца при смещении на угол 60° от горизонтального положения. При этом в вертикальном направлении жесткость системы минимальна, а в горизонтальном — максимальна. Значения граничной ширины b среза с наилучшей и наихудшей ориентацией находятся между собой в отношении 7:1. При увеличении диаметра борштанги до 80 мм положение и форма границ устойчивости существенно изменяются (рис. 4.89,а). На рис. 4.89,б показаны результаты экспериментов, когда резец крепился в борштанге некруглого сечения. На ней вблизи места крепления были профрезерованы две лыски, так что ее жесткость зависела от направления прикладываемой силы. Резец все время сохранял горизонтальное, показанное на рисунке, положение. А борштанга занимала различные угловые положения, так что направление минимальной жесткости служит вектором, до которого отсчитывается угол поворота. Эксперименты показали, что можно подобрать четыре угловых положения борштанги, при которых предельная ширина b среза максимальна.

Значительно повысить виброустойчивость процесса точения можно, сместив точку приложения силы резания относительно нейтральной оси изгиба державки (рис. 4.90,а) или изменив направление главных осей эллипса жесткости резца (рис. 4.90,б). Эта цель может быть также достигнута с помощью заточки виброгасящей фаски на главной режущей кромке (рис. 4.90,в). Угол фаски $\gamma_{\text{фас}}$ рекомендуется принимать в пределах $-80^\circ \dots -85^\circ$, а ширина фаски f равняется 0,1...0,3 мм при точении и 0,07...0,15 мм при растачивании. Вместо виброгасящей фаски можно выполнить скругление главной режущей кромки, которое, однако, требует больших затрат времени.

Для гашения колебаний при обработке на станках часто используют дополнительные устройства, либо увеличивающие демпфирование, либо создающие силы, равные и противоположные по направлению возмущающей силе. Эти устройства называют обычно *виброгасителями*.

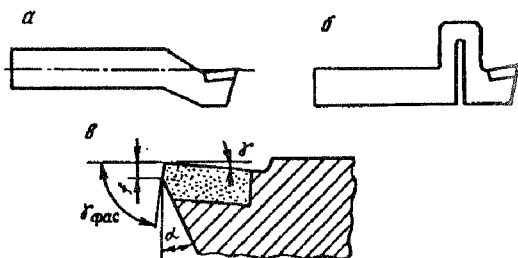


Рис. 4.90. Примеры конструкций резцов и их заточки, повышающих устойчивость процесса точения

Динамический гаситель колебаний представляет собой массу, присоединенную к основной механической системе с помощью упругого элемента и элемента трения. Наиболее эффективно он гасит

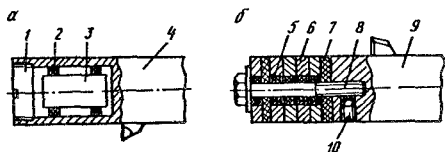


Рис. 4.91. Динамические гасители колебаний для расточных борштанг

колебания в области резонанса. Уменьшив частоту собственных колебаний динамического виброгасителя, можно добиться некоторого снижения интенсивности вибраций в дорезонансной области (особенно в области очень низких частот). Если частота собственных колебаний динамического виброгасителя больше, чем частота собственных колебаний основной системы, то существенно уменьшается эффективность гашения вибраций в зоне резонанса, но зато появляется дополнительная область гашения вибраций в зарезонансной области.

Наиболее значительное влияние на эффективность гашения колебаний в области, близкой к резонансу, оказывает логарифмический декремент колебаний основной механической системы.

Схемы конструкций динамического виброгасителя для консольных борштанг, которые используются для растачивания на алмазно-расточных станках, показаны на рис. 4.91. На конце борштанги 4 выполнена расточка, в которую помещают дополнительный груз 3 (цилиндр) с двумя резиновыми кольцами 2. Отверстие в борштанге закрывается крышкой 1. Резиновые кольца осуществляют упруго-вязкую связь дополнительного груза и борштанги (рис. 4.91,а). Рекомендуется принимать массу груза 3 равной 0,125 приведенной массы борштанги, а его длина должна быть больше двух диаметров борштанги. Рекомендуемая ширина резиновых поясков 0,125...0,17 длины груза 3.

На рис. 4.91,б показана схема конструкции многомассового динамического виброгасителя. Набор грузов 6 прижимается к торцу борштанги 9 винтом 8 через резиновую прокладку 7. В радиальном направлении грузы 6 центрируются резиновыми кольцами 5. После регулировки силы сжатия грузов 6 винт 8 стопорится винтом 10. Сила сжатия грузов зависит от диаметра борштанги и изменяется в пределах 10...40 Н. Эксперименты показали, что применение динамических виброгасителей при алмазном растачивании снижает волнистость (на 20...30%) и шероховатость (в 2...3 раза).

Более простыми и надежными в работе являются ударные гасители колебаний (рис. 4.92). В них энергия колебаний рассеивается при ударе неабсолютно упругих тел. При гармонических колебаниях с амплитудой A и частотой ω рассеяние энергии будет максимальным, если в момент удара скорости груза и основной системы будут равны и противоположно направлены. Это условие может быть выполнено при определенном соотношении зазора δ и амплитуды

колебаний A . Другими словами, время перемещения груза в пределах зазора от одной стенки до другой должно быть равно половине периода колебаний основной системы, откуда $2\delta = \pi A$.

В конструкциях, показанных на рис. 4.92, предусмотрена возможность регулирования зазора δ . Ударный гаситель колебаний расточных борштанг 1 (рис. 4.92,а) представляет собой конический груз 2 , помещенный в коническую выточку в передней части борштанги, закрытую крышкой 3 . Для регулирования зазора груз 2 фиксируется в определенном осевом положении с помощью винта 4 и пружины 5 .

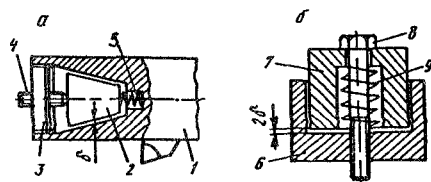


Рис 4.92 Ударные гасители колебаний

В конструкции виброгасителя, который можно прикреплять к резцу или хоботу фрезерного станка (рис. 4.92,б), зазор между грузом 7 и корпусом 6 регулируется винтом 8 и пружиной 9 . Чтобы обеспечить эффективное гашение вибраций, масса груза $m_{\text{груз}}$ должна равняться $0,33$ приведенной массы основной системы. Указанная конструкция ударного гасителя колебаний может быть использована в устройствах контактного действия. Так, например, ударный виброгаситель 2 (рис. 4.93,а) можно встроить в рычаг 3 люнета так, что он будет соприкасаться с обрабатываемой заготовкой 1 через ролик под действием сил тяжести. Аналогично действует устройство, показанное на рис. 4.93,б. В данном случае ударный гаситель 2 крепится к рычагу 3 , который может свободно поворачиваться вокруг оси 5 , присоединенной к резцедержателю 6 . Под действием сил тяжести рычаг через ролик 4 прижимается к обрабатываемой заготовке 1 . Ось этого ролика можно смещать вдоль рычага 3 так, чтобы линия, проходящая через эту ось и ось заготовки, была параллельна равнодействующей компонентов сил резания P_y и P_z . При этом эффективность виброгасителя максимальна.

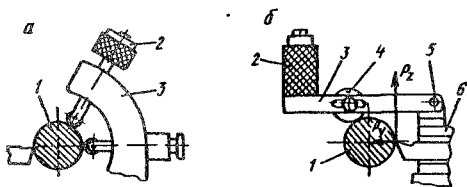


Рис 4.93 Контактно-ударные виброгасители

Рассмотренные конструкции виброгасителей не позволяют автоматически управлять процессом гашения колебаний при изменении условий обработки с целью поддержания максимальной эффективности. Поэтому разработаны и разрабатываются электронные устройства, управляющие вибраторами, которые создают силу, равную по модулю и противоположную по фазе возмущающей силе.

Волнистость шлифованной поверхности может быть снижена,

если созданы условия для «самоперерезания» волн. Для этого на этапе выхаживания рекомендуется снижать или повышать частоту вращения заготовки. Эксперименты показали, что таким способом можно снизить волнистость на 30...50%. Если в процессе шлифования периодически изменять (в пределах 12...30%) скорость вращения шлифовального круга, то, как показали эксперименты, можно в 2,5...2,8 раза уменьшать высоту волн на рабочей поверхности круга по сравнению с высотой волн при шлифовании с постоянной частотой вращения круга. На поверхности шлифованной детали высота волн уменьшается примерно в 10 раз, а параметр Ra — в 2,5...3 раза.

Для уменьшения эффекта вторичного возбуждения автоколебаний, кроме периодического изменения скорости резания, можно применять такие инструменты, как фрезы, протяжки и развертки с неравномерным шагом. Подбором неравномерности шага фрезы можно влиять и на резонансные вынужденные колебания, возбуждаемые переменностью толщины срезаемой стружки. Для борьбы с этими колебаниями неравномерность шага устанавливается из условия

$$(t_{\max} - t_{\min})/t_{\text{ср}} = nz/(60\omega),$$

где t_{\max} , t_{\min} , $t_{\text{ср}}$ — максимальный, минимальный и средний шаги фрезы; n — частота ее вращения; z — число ее зубьев; ω — частота колебаний, которые следует подавить.

Фрезы с различной неравномерностью шага работают эффективно каждая при своей скорости резания. Например, эксперименты показали, что фреза с перепадом соседних шагов, равным 1 мм, хорошо работает при скорости резания 56 м/мин, а при скорости резания 112 м/мин не дает никакого эффекта по сравнению с нормальным инструментом. Если фреза имеет перепад соседних шагов 1,5 мм, то она существенно снижает уровень вибраций при скорости 112 м/мин, а при скорости 56 м/мин не отличается от нормальной. Аналогичные явления наблюдаются при протягивании. Поэтому эффект от инструментов с переменным шагом зубьев нельзя считать достаточно универсальным, так как трудно подобрать неравномерность шага, одинаково приемлемую для относительно широкого диапазона режимов резания.

4.11.3. Использование вибраций при обработке на станках

Низкочастотные и ультразвуковые механические колебания используются в комбинации с различными способами обработки для дробления стружки, повышения стойкости инструмента, уменьшения сил резания, повышения точности формы и качества обработанной

поверхности, создания регулярного микрорельефа на обработанной поверхности. При этом используются три источника вибраций: 1) специальное устройство; 2) автоколебания технологической системы; 3) специфическая форма рабочей части инструмента. Устройства для поддержания «технологических» колебаний (осцилляторы) можно разделить на ряд функциональных элементов: первичный двигатель, преобразователи энергии, генератор колебаний, серводвигатель, исполнительное звено и т. д.

В зависимости от вида и конструктивных особенностей функциональных элементов можно систематизировать осцилляторы по следующим признакам: 1) вид энергии, используемой в генераторе колебаний и серводвигателе; 2) наличие резонанса в колебаниях исполнительного звена; 3) принцип работы генератора колебаний (кинематическое или силовое возбуждение колебаний). Направление колебаний может быть параллельно вектору скорости главного движения или подачи, т. е. лежать в плоскости, касательной к обработанной поверхности (характерно для низкочастотных колебаний), а также быть перпендикулярным к этой поверхности (характерно для ультразвуковых колебаний). Возможны и комбинации указанных направлений.

Устойчивое стружкодробление при точении с воздействием осевых (вдоль оси заготовки) колебаний имеет место, если амплитуда колебаний будет не меньше определенного значения, зависящего от условий обработки и материала заготовки (рис. 4.94 и 4.95, где кривая 1 — для стали 45, а 2 — для стали 18ХГТ). С увеличением подачи s и глубины резания t требуемое минимальное значение амплитуды осевых колебаний резца (A_{\min}) увеличивается. А при увеличении угла в плане φ оно уменьшается. Наибольшее

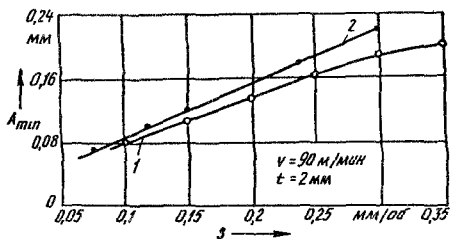


Рис. 4.94. Зависимость минимальной амплитуды колебаний, обеспечивающей стружкодробление, от подачи при точении

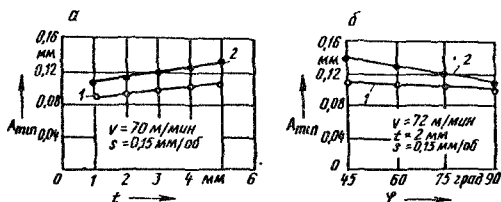


Рис. 4.95. Зависимость минимальной амплитуды колебаний, обеспечивающей стружкодробление, от параметров режима точения и реза

влияние на требуемое значение A_{\min} оказывают подача и вязкость материала заготовки.

Экспериментально установлено, что стружка при точении с воздействием осевых вибраций надежно дробится при всех частотах, отличающихся от частоты вращения заготовки n на 5...10% и более. Рекомендуется при выборе частоты f колебаний выдерживать отношение f/n близким к одному из чисел следующего ряда: 1,5; 2,5; 3,5; 4,5;..., так чтобы длина элемента стружки (без учета усадки) была 60...100 мм. Выполнение данной рекомендации снижает шероховатость обработанной поверхности. В большинстве случаев надежное стружкодробление обеспечивается только при точении с воздействием вибраций в режиме прерывистого резания (релаксационные колебания).

Экспериментально доказано, что точение с наложением низкочастотных колебаний не только обеспечивает дробление стружки, но и на 40...50% увеличивает стойкость резцов. Поскольку при этом увеличивается шероховатость обработанной поверхности, такой способ точения можно рекомендовать только для предварительной обработки. Кроме того, установлено, что в некоторых случаях осциллирующее точение значительно (в 2...3 раза) повышает параметр устойчивости технологической системы токарного станка (предельная ширина стружки b) к возникновению автоколебаний. При этом низкочастотные осевые колебания подачи создавались системой ЧПУ.

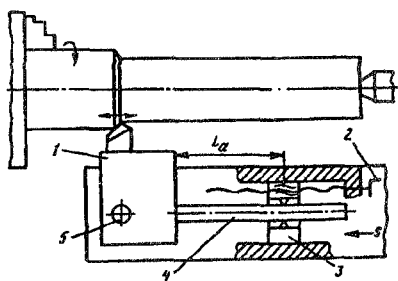


Рис. 4.96. Схема автоколебательного вибросуппорта

Применение кинематического дробления стружки при точении требует обычно серьезной модернизации станка. Этого недостатка лишен автоколебательный суппорт, схема которого показана на рис. 4.96. Он состоит из державки 1 резца, которая может совершать качательное движение вокруг оси 5. Жесткость этой системы определяется активной длиной L_a пла-

стинчатой пружины 4, которая регулируется подвижным упором 3 с помощью винта 2. В случае необходимости к державке прикрепляется дополнительный груз (на схеме не показан). Данная конструкция позволяет регулировать амплитуду и частоту колебаний. Вибрации прекращаются, когда износ резца по задней грани достигает 0,35...0,5 мм. Эксперименты показали, что в широком диапазоне скоростей резания (50...180 м/мин), подач (0,1...0,42 мм/об)

и глубин резания (0,5...2,5 мм) энергии автоколебаний было вполне достаточно для дробления стружки.

Обрабатываемость при точении высоколегированных нержавеющих и жаропрочных сталей, а также титановых сплавов существенно повышается при использовании высокочастотных тангенциальных вибраций (параллельных скорости резания). Некоторые результаты испытания данного метода показаны на рис. 4.97; графики 1 относятся к точению стали 12X18H10T без вибраций, а 2 — к точению с вибрациями, амплитуда которых $A = 0,2$ мм, а частота $f = 175$ Гц. Графики на рис. 4.97 показывают, что при скорости резания 40 м/мин стойкость T резцов при обычном точении выше, чем при точении с тангенциальными вибрациями. А при скорости 120 м/мин в зависимости от подачи s стойкость резца при точении с вибрациями повышается в 2...4 раза. Средняя скорость резания (80 м/мин) при точении является некоторой критической величиной, определяющей переход из области отрицательного влияния вибраций в область положительного влияния. Увеличение амплитуды вибраций снижает выигрыш в стойкости в 1,5...2 раза.

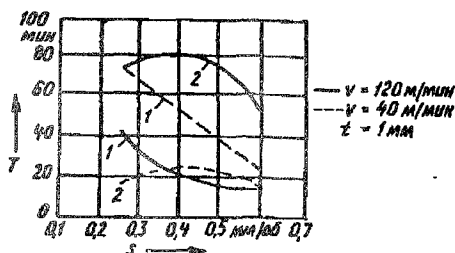


Рис. 4.97. Зависимость стойкости резца от параметров режима точения

Значительное улучшение обрабатываемости при сверлении прежде всего за счет облегчения процесса удаления стружки и повышения эффективности действия СОЖ достигается путем задания принудительных вибраций инструменту или заготовке в осевом направлении. При обработке отверстий относительно малого (1...4 мм) диаметра наложение осевых вибраций с частотой 75...150 Гц значительно повышает стойкость δT инструмента (рис. 4.98), которая характеризуется количеством отверстий, просверленных до поломки сверла, а также параметры качества обработанной поверхности. Эффективность наложения вибраций зависит от диаметра сверла и

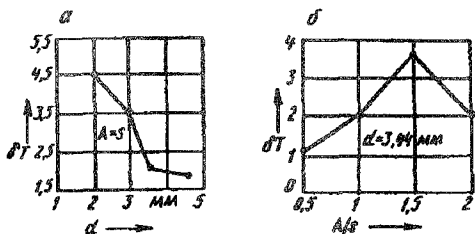


Рис. 4.98. Зависимость относительной стойкости сверла от диаметра d отверстий (а) и отношения амплитуды A к подаче s (б)

Эффективность наложения вибраций зависит от диаметра сверла и

эффективности действия СОЖ достигается путем задания принудительных вибраций инструменту или заготовке в осевом направлении. При обработке отверстий относительно малого (1...4 мм) диаметра наложение осевых вибраций с частотой 75...150 Гц значи-

относительной амплитуды колебаний. Она повышается при уменьшении диаметра обрабатываемого отверстия, а при $A = (1...1,5)s$ достигает максимума. При вибросверлении параметр шероховатости Ra снижается в 2...3 раза. Кроме того, значительно уменьшается увод (искривление оси) отверстия.

Особые затруднения в производственных условиях вызывает сверление глубоких отверстий. Для удаления стружки при обычном сверлении приходится периодически прерывать процесс и выводить сверло. Вибросверление глубоких отверстий обеспечивает надежное дробление и вынос стружки из обрабатываемого отверстия. Его лучше выполнять не стандартным спиральным сверлом, а инструментом, показанным на рис. 4.99 (особенно при обработке отверстий небольшого диаметра). В данном случае СОЖ подается через внутренний и боковые каналы в сверле.

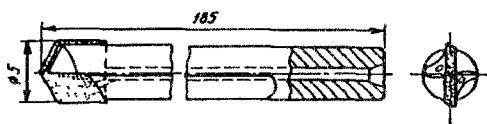


Рис 4.99 Сверло с напайкой из твердого сплава для вибросверления глубоких отверстий малого диаметра

Для вибросверления отверстий диаметром до 10 мм и глубиной до 200 мм можно рекомендовать следующее: 1) применять подачи, в 1,2...1,5 раза превышающие подачи при обычном сверлении; 2) скорости резания выбирать такие же, как при обычном сверлении, с учетом материала инструмента и заготовки; 3) отношение частоты f вибраций к частоте вращения n_3 заготовки (или сверла) следует принимать 17:8 или 19:8 при частоте вращения заготовки до 15 об/с и 9:8 или 11:8 при большей частоте вращения; 4) амплитуду вибраций $2A$ для сверления отверстий глубиной 5...8 диаметров следует выбирать в пределах $(1...2)s$, а для отверстий глубиной более 8 диаметров — в пределах $(2...3)s$.

Наложение ультразвуковых колебаний на инструмент при развертывании и зенкерования отверстий в заготовках из жаропрочных сталей, титановых и алюминиевых сплавов снижает силы резания в 1,5...2 раза, повышает стойкость инструмента в 2 раза и производительность обработки отверстий в 1,5...2 раза.

Ультразвуковое нарезание резьб в заготовках из труднообрабатываемых материалов также уменьшает силы резания в 1,5...2 раза, исключает срывы ниток резьбы и заклинивание метчиков, повышает производительность резьбонарезания (в 2...4 раза) и точность получаемой резьбы. Колебания при нарезании резьбы направлены вдоль оси метчика, но могут быть и крутильными. Последние, правда, менее эффективны.

Воздействие вибраций значительно улучшает показатели абра-

живной обработки. Для улучшения процессов шлифования и заточки используют колебания как низких, так и высоких (ультразвуковых) частот. Направление низкочастотных колебаний совпадает с обрабатываемой рабочей поверхностью шлифовального круга (т. е. с осью вращения круга), а ультразвуковые колебания могут быть как осевыми, так и радиальными (т. е. перпендикулярными к обработанной поверхности). При шлифовании с вибрациями улучшается процесс самозатачивания круга, повышается производительность, уменьшается опасность прижогов и уменьшается значение параметра шероховатости. Силовое ограничение производительности при шлифовании с радиальными ультразвуковыми (20 кГц) вибрациями зависит от амплитуды колебаний. Так, при увеличении амплитуды колебаний от 5 до 30 мкм значение коэффициента режущей способности $K_{реж}$ возрастает в 1,5 раза.

При алмазном хонинговании с наложением круговых вибраций производительность процесса существенно возрастает с увеличением частоты и амплитуды колебаний (при частоте колебаний 12,5 Гц и амплитуде 3 мм производительность увеличивается в 2,5 раза, а конусность хонингуемого отверстия остается такой же, как и при обычном хонинговании).

При суперфинишировании с наложением дополнительных ультразвуковых колебаний, направленных перпендикулярно к обрабатываемой поверхности, производительность по сравнению с обычным процессом увеличивается в 2 раза и более, возрастает выход годной продукции, уменьшается чувствительность к разбросу твердости брусков. Шероховатость поверхности соответствует параметру $Ra = 0,02...0,12$ мкм при исходном значении $Ra = 0,2...1,25$ мкм, причем Ra исходной поверхности оказывает незначительное влияние на параметр Ra , полученный после вибросуперфиниширования. Лучше, чем при обычном суперфинишировании, исправляются погрешности формы (волнистость, огранка). Обычно суперфиниширование с ультразвуковыми колебаниями осуществляют в два этапа. На втором (отделочном) этапе ультразвуковые колебания отключают и уменьшают давление бруска.

Наложение вибраций при обработке способами ППД преследует одну из следующих целей: 1) создание регулярного или нерегулярного микрорельефа поверхности с заданными характеристиками (глубина и ширина канавок, относительная несущая поверхность); 2) интенсификация процесса пластического деформирования материала заготовки, чтобы при меньших силах достигнуть требуемой микрогеометрии поверхности и степени упрочнения материалов. Заданный микрорельеф может быть получен и без наложения вибраций с помощью фасонных роликов (рис. 4.100). Параметры выдавливаемых канавок (ширина $b_{кан}$ и глубина $h_{кан}$) зависят от силы

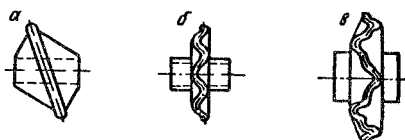


Рис. 4.100. Ролики для образования микрорельефа на поверхности вибрационной отделочно-упрочняющей обработкой ППД (без наложения вибраций): а — наклонный; б — синусоидальный; в — косинусоидальный

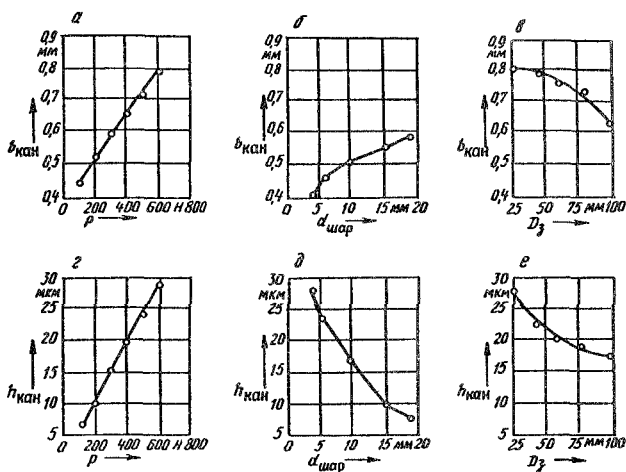


Рис. 4.101. Зависимость ширины и глубины канавок от параметров режима виброобкатывания титанового сплава ВТ1-1

прижима P инструмента, диаметра шара $d_{шар}$ и диаметра заготовки D_3 , как это показано на рис. 4.101.

Вторая из указанных выше целей виброобработки способами ППД достигается наложением ультразвуковых колебаний в направлении, перпендикулярном к обрабатываемой поверхности. Это рационально при обработке: 1) заготовок из инструментальных и высоколегированных сталей (У8, У12, 12Х13, ШХ15 и др.) после термической обработки; 2) заготовок и инструментов из твердых сплавов (ВК8, ВК15, ВК30); 3) заготовок большого диаметра и заготовок малой жесткости; 4) заготовок с тонкими гальваническими покрытиями; 5) поверхностей сложной формы (тогда копиром может служить сама обрабатываемая поверхность).

Наложение ультразвуковых вибраций при обработке способами ППД в десятки раз увеличивает скорость пластической деформации, в 3...9 раз — давление в зоне контакта при той же силе прижима инструмента к поверхности, что и при обычном ППД.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Дайте определение понятия «база».
2. Как различают базы по назначению?
3. Как различают базы по числу связей?
4. Как различают базы по числу лишаемых степеней свободы?
5. Изобразите схему базирования 1-го класса.
6. Изобразите схему базирования 2-го класса.
7. Изобразите схему базирования 3-го класса.
8. Как располагают точки направляющей базы по отношению к установочной?
9. Как располагают опорную базу по отношению к установочной и двойной опорной базам?
10. Дайте определение понятия «размерная настройка».
11. Изобразите схему размерной настройки.
12. Укажите методы базирования.
13. Укажите достоинства и недостатки базирования по разметке.
14. Укажите достоинства и недостатки базирования выверкой.
15. Укажите достоинства и недостатки базирования сопряжением.
16. Назовите методы размерной настройки.
17. Укажите недостатки размерной настройки по эталону.
18. Укажите недостатки размерной настройки методом пробной стружки.
19. Укажите цели размерной настройки на партию.
20. Назовите этапы (процедуры) размерной настройки на партию.
21. Дайте определение понятия «поле рассеяния размеров».
22. Дайте определение понятия «доверительный интервал» для выборочного среднего.
23. Дайте определение понятия «оптимальная точность размерной настройки».
24. От чего зависит оптимальная точность размерной настройки?
25. Укажите виды размерных цепей.
26. Как привести плоскую размерную цепь к линейной?
27. Дайте определение понятия «технологическая размерная цепь».
28. Как можно уменьшить число звеньев технологической размерной цепи?
29. Как связан фактический размер с размером настройки?
30. Дайте определение понятий «податливость» и «жесткость».
31. Запишите определяющее уравнение для жесткости технологической системы.
32. В каких случаях жесткость технологической системы будет отрицательной?
33. Дайте определение понятия «динамическая жесткость».
34. От каких параметров системы зависит динамическая жесткость?
35. Чему равна податливость последовательно соединенных элементов?
36. Назовите особенности производственного метода определения жесткости технологической системы.
37. Назовите методы обеспечения заданной точности замыкающего звена размерной цепи.
38. В чем состоит эффект метода неполной взаимозаменяемости?
39. Назовите недостатки метода групповой взаимозаменяемости.
40. От чего зависит число групп при реализации метода групповой взаимозаменяемости?

41. Назовите методы конструкторской компенсации.
42. Приведите классификацию причин погрешностей обработки.
43. Назовите условие возникновения погрешности схемы базирования.
44. Назовите причину возникновения погрешности схемы базирования.
45. Сформулируйте алгоритм определения погрешности схемы базирования для многозвенной размерной цепи.
46. От чего зависит фактический размер обработки?
47. От чего зависит коэффициент наследования погрешности заготовки?
48. Назовите основной путь борьбы с релаксационными погрешностями.
49. Назовите способы автоматического управления точностью обработки.
50. Что такое прижог?
51. Назовите пути борьбы с прижогами.
52. Как зависит параметр шероховатости от условий лезвийной обработки?
53. Как зависит параметр шероховатости от условий обработки способами ППД?
54. Чем автоколебания отличаются от вынужденных колебаний?
55. Назовите методы борьбы с вибрациями.
56. В каких случаях вибрации являются полезными?

5 ЭФФЕКТИВНОСТЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

5.1. Основные понятия

— Для сравнения вариантов технологического процесса (или его элементов) между собой по степени предпочтительности следует использовать понятие «*эффективность*» — отнесенный к затратам ресурсов результат деятельности технической системы на определенном интервале времени. Результат деятельности в данном случае заключается в изготовлении конкретных машин (их деталей) в заданном количестве, в соответствии с требуемым уровнем качества и с определенными затратами ресурсов.

Различают два класса показателей (критериев) эффективности: технические и экономические, которые могут быть абсолютными и относительными. В курсе «Основы технологии машиностроения» рассматриваются только технические критерии, оценивающие производительность, и экономические, оценивающие сумму приведенных затрат.

Производительность характеризует объем производства, выполненный за единицу времени. Она относится либо к переходу (элементарному, инструментальному или блочному), либо к операции. Определяющее влияние на производительность перехода $Q_{\text{прх}}$ оказывает производительность формообразования поверхности, или, другими словами, *технологическая производительность* Q_T , которая характеризует скорость генерирования (образования) обрабатываемой поверхности:

$$Q_T = F/\tau_0 \quad (\text{см}^2/\text{мин}),$$

где F — площадь (либо проекция площади на плоскость или цилиндр) обработанной на данном переходе поверхности; τ_0 — основное время обработки.

На выполнение перехода затрачивается основное время τ_0 , вре-

мя на вспомогательные перемещения $\tau_{в.п}$, время на манипуляции, связанные с переходом $\tau_{прх}$, а иногда и время на индивидуальную размерную настройку $\tau_{р.н}$. Тогда

$$Q_{прх} = 1/(\tau_0 + \tau_{в.п} + \tau_{прх} + \tau_{р.н}) \text{ (мин}^{-1}\text{)}.$$

Если обозначить время потерь на переходе $\tau_{п.п} = \tau_{в.п} + \tau_{прх} + \tau_{р.н}$, то

$$Q_{прх} = Q_T / (F + Q_T \tau_{п.п}). \quad (5.1)$$

Производительность однопереходной операции определяется формулой

$$Q_{одн} = 1/(\tau_0 + \tau_{в1} + \tau_{в2}),$$

где $\tau_{в1}$ — вспомогательное время, зависящее от режима резания; $\tau_{в2}$ — вспомогательное время, не зависящее от него.

Если подставить в формулу (1.4) значение количества заготовок,

мента, получим

$$Q_{одн} = Q_T / (F(1 + (\tau_{с.и} + \tau_{р.н})/T) + Q_T \tau_{в2}), \quad (5.2)$$

где $\tau_{с.и}$ — время на смену инструмента; $\tau_{р.н}$ — время размерной настройки.

При увеличении интенсивности формообразования поверхности производительность перехода, согласно формуле (5.1), возрастает, но не может стать больше $\tau_{п.п}^{-1}$. Если подставить в выражение (5.2) зависимость стойкости от Q

максимум при

$$Q_{т.опт} = C / ((\mu - 1)(\tau_{с.и} + \tau_{р.н}))^m,$$

где $m = 1/\mu$.

Относительным техническим критерием будет *индекс производительности* $I_{пр}$, который представляет собой отношение производительности Q_a альтернативного процесса формообразования (перехода или операции) к производительности $Q_б$ базового, т. е.

$$I_{пр} = Q_a / Q_б.$$

Технологическая производительность способа формообразования

растачивании цилиндрической поверхности, при сверлении, зенковании и развертывании

$$Q = 1000 \nu s L / L$$

ной экономической эффективности, $E_{\text{норм}} = 1/T_{\text{норм}}$; $T_{\text{норм}}$ — нормативный срок окупаемости дополнительных капитальных затрат (принимается $E_{\text{норм}} = 0,12$).

Себестоимость

$$C_i = (M + 3П + A + P + И + Э + Пл)_i,$$

где M — стоимость основных и вспомогательных материалов; $3П$ — заработная плата основных и вспомогательных рабочих; A — амортизационные отчисления от технологического оборудования и приспособлений; P — затраты на ремонт оборудования и управляющих устройств; $И$ — затраты на режущий инструмент; $Э$ — затраты на энергию для технологических целей; $Пл$ — затраты на амортизацию и содержание производственных площадей.

Критерий W_i может быть определен в условиях массового производства. В условиях серийного производства удобно пользоваться в качестве экономического критерия эффективности приведенными затратами Z на выполнение операции (или перехода):

$$Z = E \tau_{\text{шк}} + Z_{\text{и}}/N_T \text{ (р/шт.)}, \quad (5.3)$$

где E — затраты на эксплуатацию рабочего места за 1 мин; $\tau_{\text{шк}}$ — штучно-калькуляционное время; $Z_{\text{и}}$ — затраты на эксплуатацию инструмента (группы инструментов) за период его стойкости; N_T — количество заготовок, обработанных за период стойкости.

Относительным экономическим критерием будет индекс эффективности $I_{\text{эф}}$, который представляет собой отношение затрат на реализацию базового ($Z_б$) и альтернативного ($Z_а$) переходов (или операций): $I_{\text{эф}} = Z_б/Z_а$.

На этапе проектирования эффективность технологического процесса достигается его оптимизацией, под которой понимается комплекс решений, обеспечивающих минимальное значение экономического критерия и вместе с тем соблюдение системы ограничений. Система ограничений отражает требования к качеству продукции, технологическим возможностям оборудования, приспособлений и инструмента, организационно-техническим возможностям данного производства, производительности, диктуемой планом.

Задача оптимизации может быть разделена на два уровня: 1) параметрическая оптимизация — выбор (расчет) оптимальных технологических параметров для конкретного варианта технологического процесса обработки заготовки, обеспечивающих минимум (или максимум) критерия оптимальности (эффективности) и одновременно удовлетворяющих всем ограничениям; 2) вариантная оптимизация — выбор оптимального варианта технологического процесса

изготовления детали. Варианты технологических процессов различаются маршрутом, временной структурой операций, набором переходов, оборудованием, оснасткой и т. д.

Параметрическая оптимизация является основой вариантной, так как последняя позволяет выявлять оптимальный вариант технологического процесса только в том случае, когда для каждого из сравниваемых вариантов предварительно определены оптимальные технологические параметры. Любой технологический процесс можно характеризовать тремя группами параметров:

1) искомые параметры X , которые обеспечивают наибольшую эффективность процесса по выбранному критерию в рамках конкретного варианта (элементы режима резания, межпереходные припуски и допуски, точность размерной настройки и т. д.);

2) фазовые параметры Y , которые являются функцией искомого (например, сила резания, мощность, интенсивность изнашивания инструмента, параметр шероховатости поверхности и др.);

3) исходные параметры Z , неизменные при данном варианте технологического процесса (жесткость технологической системы, свойства материала обрабатываемой заготовки, свойства материала инструмента, форма и размеры обрабатываемой заготовки и т. д.).

Зависимость критерия оптимальности $K_{\text{опт}}$ от исходных, искомого и фазовых параметров называется *функцией цели*:

$$K_{\text{опт}} = f_{\text{цел}}(Z, X, Y).$$

Чтобы использовать это уравнение для оптимизации, необходимо знать зависимость Y от Z и X , т. е. математические модели процесса $Y = f(Z, X)$.

Все ограничения необходимо представить в виде неравенств, каждое из которых определяет допустимые пределы варьирования соответствующего фазового или искомого параметра, который в общем случае зависит от других фазовых параметров, а также от искомого и исходных.

5.2. Функции цели и модели ограничений параметрической оптимизации

При параметрической оптимизации решается обычно одна из следующих технико-экономических задач выбора параметров режима резания, обеспечивающих: 1) минимум затрат (денег), связанных с процессом обработки; 2) максимум производительности; 3) минимум затрат при заданной производительности. Первая, наиболее общая, задача характерна для условий обработки на универсальных станках в серийном производстве, вторая — для лимитирующих позиций станочных систем, третья — для условий

обработки на станках и автоматических линиях массового производства.

В основе решения всех описанных оптимизационных задач лежит модель процесса резания, которая отражает зависимость стойкости T режущего инструмента от параметров режима обработки. Наиболее часто применяемой является эмпирическая модель со следующей структурой:

$$T^m = 318C_v K_v D^{q-1} / (n t^x s^y z^u b^r), \quad (5.4)$$

где C_v — эмпирический параметр, постоянный для группы обрабатываемых материалов; K_v — коэффициент, зависящий от свойств обрабатываемого материала и инструмента, а также других условий резания; D — диаметр (инструмента или заготовки); n — частота вращения (инструмента или заготовки); t — глубина резания; s — подача (на один зуб инструмента либо на один оборот); z — число зубьев инструмента; b — ширина заготовки; m, x, y, u, r, q — эмпирические параметры (показатели степени), зависящие от вида обработки, свойств инструмента и условий резания.

Значения, которые приобретают параметры t, q, x, y, u, r при различных способах обработки, приведены в табл. 5.1. Следовательно, для переходов точения модель (5.4) принимает вид

$$T^m = C_v K_v / (v t^x s^y), \quad (5.5)$$

где v — скорость резания.

Табл. 5.1. Изменение параметров модели стойкости

Способ обработки	t	x	y	q	u	r
Фрезерование	t	x	y	q	u	r
Поперечное точение	1	0	y	0	0	0
Продольное точение	t	x	y	0	0	0
Сверление	1	0	y	q	0	0
Рассверливание, зенкерование и развертывание	t	x	y	q	0	0
Строгание	t	x	y	0	0	0

В логарифмической системе координат зависимость (5.5) линейна. Однако, как показали многочисленные эксперименты, при расширении диапазона значений скорости v резания наблюдаются существенные отклонения от линейности (рис. 5.3). В таких случаях предлагается формула вида

Рис. 5.3. Зависимость стойкости T инструмента от скорости резания v и подачи s при точении (— — — согласно экспериментам, ——— согласно модели (5.5); резацма из быстрорежущей стали (I); твердого сплава (II))

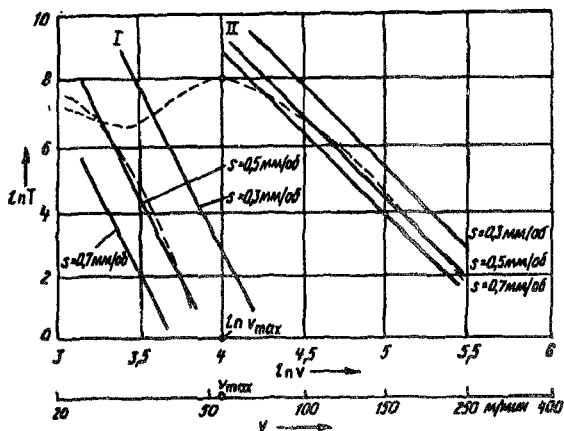
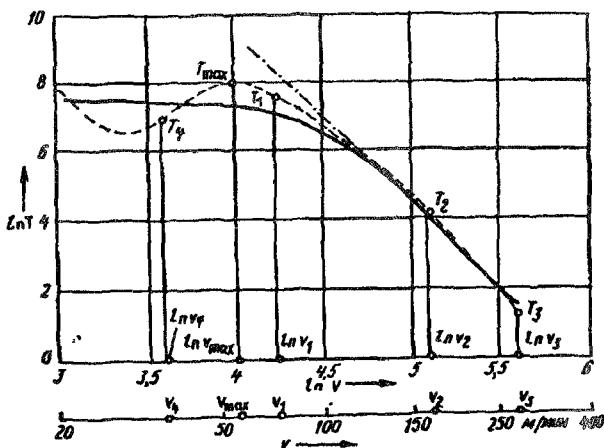


Рис. 5.4. Зависимость стойкости инструмента от скорости резания при точении (— — — согласно экспериментам; ——— согласно модели (5.6); - - - - согласно модели (5.5))



$$T = A / (v^\mu + A / T_{\text{пред}}), \quad (5.6)$$

где $A = (C_v K_v / (t^x s^y))^\mu$; $\mu = 1/m$; $T_{\text{пред}}$ — предельная стойкость инструмента (при очень малых скоростях резания); m — эмпирический параметр.

Как следует из графиков, показанных на рис. 5.4, модель (5.6) в области относительно небольших скоростей резания (25...75 м/мин) лучше отражает результаты эксперимента, чем модель (5.5).

При необходимости обеспечить максимум производительности в качестве функции цели принимается выражение (1.2), а при необходимости обеспечить минимум затрат — выражение (5.3). Из функции цели можно исключить $\tau_{\text{пз}}$, $\tau_{\text{об}}$, $\tau_{\text{от}}$, $\tau_{\text{в2}}$, так как эти составляющие $\tau_{\text{шк}}$ не зависят от параметров режима резания. За-

висимость τ_0 от параметров режима резания определяется временной структурой операции.

Модели ограничений, связанных с требованиями к качеству обработанной лезвийным инструментом поверхности, имеют вид

$$Ra \geq K_R s^{k_1} / v^{k_2},$$

где K_R , k_1 и k_2 — экспериментальные параметры модели, зависящие от способа обработки и обрабатываемого материала. Их значения, согласно справочникам, изменяются в широком диапазоне. Знак параметра k_2 зависит от области скоростей резания, которая используется при данном способе обработки.

При шлифовании с продольной подачей $s_{\text{прод}}$ в качестве модели ограничения по Ra можно пользоваться выражением

$$Ra \geq K_R s_{\text{прод}}^{k_3} s_{\text{рад}}^{k_4} N_z^{k_5} / (v_3^{k_6} i^{k_7}), \quad (5.7)$$

где Ra — заданное максимально допустимое значение параметра шероховатости; $s_{\text{прод}}$ измеряется в долях ширины круга; $s_{\text{рад}}$ — радиальная подача на двойной ход; N_z — параметр зернистости круга; v_3 — скорость шлифуемой заготовки; i — число проходов выхаживания; $k_3 \dots k_7$ — эмпирически определенные параметры модели.

Значения параметров модели (5.7) приведены в справочной литературе в зависимости от вида шлифования (круглое, внутреннее, плоское).

Ограничениями режимов резания по требуемой точности являются упругие деформации элементов технологической системы под действием сил резания. Они становятся особенно значимыми при относительно малой жесткости элементов технологической системы (заготовки инструмента), при существенной зависимости жесткости от координат точки обработки, при переменной силе резания, присущей данному способу формообразования или обусловленной переменной скоростью припуска. В общем случае модель ограничения по упругой деформации имеет вид

$$\Delta_{\text{доп}} > P_y / j,$$

где $\Delta_{\text{доп}}$ — допустимая упругая деформация по оси Y ; j — жесткость технологической системы. Сила резания P_y определяется известной из теории резания формулой (для точения и растачивания):

$$P_y = C_y t^{x_2} s^{y_2} v^{w_2}.$$

Технологические возможности оборудования ограничивают нижний и верхний уровни значений подачи s и частоты вращения n .

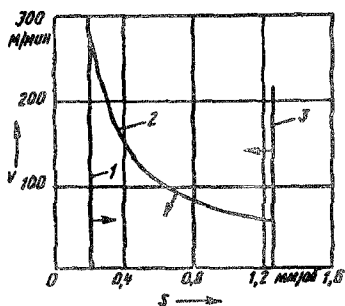


Рис. 5.5. Области допустимых значений v и s при точении, ограниченных характеристиками станка: 1,3 — по коробке подач; 2 — по мощности привода главного движения

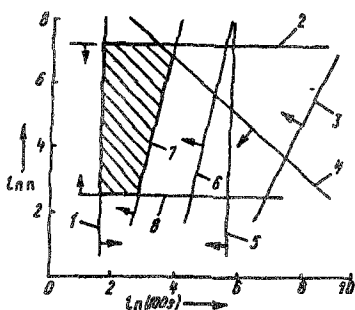


Рис. 5.6. Область допустимых при точении значений v и s (заштрихована) в логарифмической системе координат

Кроме того, на большинстве станков v и s могут принимать только определенный набор дискретных значений.

При предварительной обработке режимы резания могут ограничиваться эффективной мощностью привода, прочностью механизмов станка, прочностью инструмента (пластины твердого сплава), а также надежностью закрепления заготовки в приспособлении. Соответствующие модели приведены в справочной литературе. При обработке относительно протяженных поверхностей необходимо, чтобы период стойкости инструмента T был больше основного времени τ_0 .

Каждое из технических ограничений выделяет на плоскости координат $v(n) - s(s_2)$ область допустимых значений параметров режима резания (рис. 5.5). Совокупность технических ограничений образует на плоскости $v(n) - s(s_2)$ замкнутую область, любая точка внутри которой характеризует допустимое сочетание скорости и подачи. В логарифмической системе координат все ограничения принимают форму отрезков прямых (рис. 5.6). На этом рисунке линии 1 и 8 — ограничения по минимальным значениям s и v , линии 2 и 5 — по максимальным, линия 3 — ограничение по жесткости заготовки, линия 4 — ограничение по мощности, линии 6 и 7 — ограничения по прочности и жесткости режущего инструмента. В приведенном выше случае ограничения линиями 1, 2, 4, 7 и 8 являются «активными», а ограничения линиями 3, 5 и 6 можно назвать «пассивными», так как они не оказывают влияния на допустимые значения подачи и скорости резания.

Форма области допустимых техническими ограничениями значений оптимизируемых параметров режима резания зависит от вида и конкретных условий обработки.

5.3. Оптимизация режимов резания для элементарного и инструментального переходов

Алгоритм оптимизации режима резания рассмотрим на примере обтачивания цилиндрического участка вала диаметром d с длиной рабочего хода $L_{р.х}$. В качестве критерия оптимизации приняты приведенные затраты на выполнение перехода (формула (5.3)). Подставляя в функцию цели (формула (5.3)) значения ее элементов согласно формулам (1.2)...(1.5), (5.5) и учитывая известную зависимость τ_0 от параметров режима резания и обрабатываемой поверхности, получаем

$$Z = E(A_1/(sv) + A_3v^{\mu_1}s^{\mu_2}), \quad (5.8)$$

где $E = E_{\text{мин}} + E_{\text{ст}}$;

$$\left. \begin{aligned} A_1 &= \pi d L_{р.х} / 1000; \\ A_2 &= C_v K_v / t^x; \\ A_3 &= (\tau_{с.и} + Z_{и}/E) A_1 / A_2; \end{aligned} \right\} \quad (5.9)$$

$\mu_1 = \mu - 1$, $\mu_2 = y/\mu - 1$, $\mu = 1/m$ — показатели степени; $E_{\text{мин}}$ — минутная зарплата рабочего; $E_{\text{ст}}$ — минутные затраты, компенсирующие амортизацию станка и капитальные затраты.

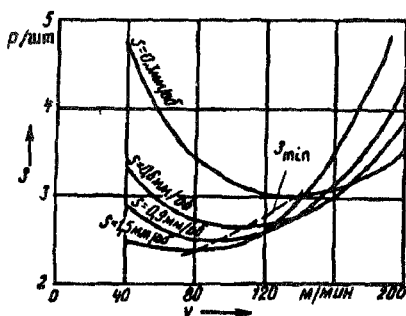


Рис. 5.7. Зависимость приведенных затрат от параметров режима точения (s — подача)

Z по v . Тогда, согласно формуле (5.8), получаем

$$A_1/(sv_{\text{опт.э}}^2) + A_3(\mu - 1) s^{\mu_2} v_{\text{опт.э}}^{\mu_1 - 1} = 0,$$

откуда с учетом выражений (5.9) имеем

$$v_{\text{опт.э}} = C_v K_v / (((\mu - 1)(\tau_{с.и} + Z_{и}/E))^{m_1} t^x s^y),$$

Зависимость затрат Z от скорости резания v и подачи s показана на рис. 5.7. Из графиков на этом рисунке следует, что при любой подаче существует оптимальное значение скорости v резания, которому соответствует минимум затрат на выполнение перехода. С увеличением подачи оптимальная скорость резания и $Z_{\text{мин}}$ монотонно уменьшаются.

— Оптимальное по экономическому критерию значение скорости резания $v_{\text{опт.э}}$ можно найти, приравняв нулю производную от

$$(\mu - 1)(\tau_{с.и} + Z_{и}/E) = T_{\text{опт.э}} \quad (5.10)$$

где $T_{\text{опт.э}}$ — оптимальная по экономическому критерию стойкость инструмента. Следовательно,

$$v_{\text{опт.э}} = C_v K_v / (T_{\text{опт.э}}^m t^x s^y) \quad (5.11)$$

Если пренебречь затратами $Z_{и}$ на эксплуатацию режущего инструмента за период его стойкости, то выражение (5.10) дает значение стойкости, оптимальной по критерию максимальной производительности ($T_{\text{опт.п}}$), т. е.

$$T_{\text{опт.п}} = (\mu - 1)\tau_{с.и}$$

и

$$v_{\text{опт.п}} = C_v K_v^m / (T_{\text{опт.п}}^m t^x s^y) \quad (5.12)$$

Как $v_{\text{опт.э}}$, так и $v_{\text{опт.п}}$ зависят от значений глубины резания t и подачи s . На рис. 5.7 видно, что, несмотря на уменьшение $v_{\text{опт.э}}$, связанное с увеличением s , эффективность точения повышается (т. е. Z_{min} уменьшается). При предварительной обработке эффективность перехода обусловлена объемной производительностью формообразования, т. е. скоростью Q удаления припуска ($Q = tsv$). Если подставить значение v согласно формуле (5.11) или (5.12), то получим

$$Q = (C_v K_v / T_{\text{опт.э}}^m) t^{1-x} s^{1-y} \quad (5.13)$$

При любых разновидностях точения с продольной подачей и прямым срезом ($t > s$) $x < y < 1$. Следовательно, согласно выражению (5.13), увеличение глубины резания t и подачи s за

прочностью режущей пластины, либо прочностью механизмов станка, либо упругой деформацией технологической системы. Однако сила резания зависит от скорости резания, которая на этом этапе еще неизвестна. В таких случаях из выражения (5.11) или (5.12) подача исключается путем подстановки из соответствующих моделей ограничения.

Если при выводе выражения (5.8) вместо формулы (5.5) воспользоваться выражением (5.6), которое отражает зависимость между стойкостью инструмента и параметрами режима резания в более широком диапазоне скоростей резания, то получим

$$v_{\text{опт.э}} = C_v K_v G / (T_{\text{опт.э}}^m t^{x_s} s^y), \quad (5.14)$$

где $G = (1 + T_{\text{опт.э}} / ((\mu - 1) T_{\text{пред}}))^m$.

Значения $v_{\text{опт.э}}$, вычисленные по формулам (5.11) и (5.14), различаются при обычных условиях течения незначительно (на 0,5...1,5%). Пользоваться формулой (5.14) следует только при точении с большими подачами и дорогим инструментом.

Однако точные значения параметров μ , $\tau_{с.и}$, $Z_{и}$ и E , которые используются для оценки оптимальной скорости резания по формулам (5.11)...(5.14), никогда не бывают известны. Данные, приведенные в справочной литературе, являются среднестатистическими и, следовательно, приближенными.

Исследования показали, что при идентичных инструментальных и обрабатываемых материалах и одинаковой геометрии резца в разных лабораториях получены разные значения μ , отличающиеся от среднего на 25...45% в ту и другую стороны. Но погрешность оценки параметров μ , $\tau_{с.и}$, $Z_{и}$ и E в пределах 25% вполне допустима, так как при этом неправильно оцененная и установленная на станке скорость резания v приведет к увеличению затрат не более чем на 5...10%.

Порядок расчета оптимальных значений параметров режима резания для сверления, зенкерования и фрезерования такой же, как при точении. Различаются только структура и параметры моделей ограничений и формул для расчета скорости резания. При оптимизации необходимо проводить расчеты с учетом нескольких ограничений.

Довольно часто имеют место случаи, когда выполнение инструментального перехода осуществляется при изменяющейся скорости резания (например, при точении или растачивании ступенчатой заготовки либо конуса с постоянной частотой вращения). Модель для вычисления оптимальной по экономическому критерию частоты вращения $n_{\text{опт.э}}$ при точении ступенчатого вала длиной L была получена на основе модели изнашивания:

$$n_{\text{опт.э}} = \frac{1000C_v(L/MH)^m}{\pi S^y}, \quad (5.15)$$

где

$$L = \sum_{i=1}^k L_i; \quad M = \sum_{i=1}^k ((t_i^* d_i)^\mu L_i);$$

$$H = (\mu - 1)(\tau_{\text{с.и}} + Z_{\text{и}}/E);$$

t_i — глубина резания на i -й ступени диаметром d_i и длиной L_i ;
 k — число ступеней вала.

Обычно при оптимизации режимов точения ступенчатых или конусных поверхностей вычисление частоты вращения ведется по максимальному диаметру заготовки. При этом теряется производительность из-за уменьшения значения $n_{\text{опт.э}}$. Относительное уменьшение частоты вращения $\delta n = n_{\text{опт.э}}/n_p - 1$ (здесь n_p — расчетная по d_{max} частота вращения заготовки) можно определить из выражения

$$\delta n = (1 / (\sum_{i=1}^k \lambda_i \beta_i^\mu)^m) - 1,$$

где $\lambda_i = L_i/L$; L — общая длина вала; $\beta_i = d_i/d_{\text{max}}$.

Например, при обработке вала с параметрами:

i	....	1	2	3	4
λ_i	....	0,1	0,25	0,35	0,3
β_i	....	1	0,8	0,75	0,6

и при $\mu = 4$ $\delta n = 0,298$. Такая потеря производительности (29,8%) из-за неиспользования модели (5.15) является существенной, и ею нельзя пренебрегать.

5.4. Оптимизация режима обработки однородным блоком

Варианты блочных переходов показаны на рис. 5.8. В таких случаях инструменты блока либо одновременно начинают, либо одновременно заканчивают обработку. Один из инструментов с максимальной длиной рабочего хода будем называть *лимитирующим* по основному времени. Если инструменты блока принадлежат к одному типу и в них использован один и тот же инструментальный материал, то такой блок будем называть однородным (рис. 5.8, а, в). В неоднородном блоке (рис. 5.8, б) работают два резца и одно сверло.

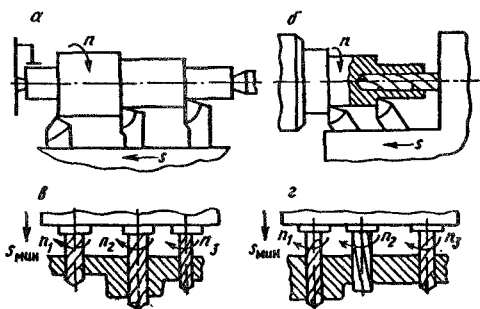


Рис. 5.8. Варианты блочных переходов

Характерной особенностью работы блока инструментов является наличие общих параметров режима резания. Это может быть частота вращения n и подача s (рис. 5.8, а, б) или общая минутная подача $s_{\text{мин}}$ для всех инструментов многошпиндельной головки (рис. 5.8, в, г), каждый из которых имеет свою частоту вращения n_i и подачу s_i .

При обработке многоинструментными наладками, в частности блоками, возможны следующие схемы замены затупившихся инструментов: 1) *раздельная*, когда каждый инструмент блока заменяется по мере исчерпания ресурса его стойкости; 2) *параллельная*, когда заменяется весь блок инструментов по мере исчерпания ресурса стойкости любого из инструментов блока; 3) *параллельно-групповая*, когда блок инструментов разбит на группы, в каждую из которых входят инструменты с приблизительно одинаковой стойкостью. Любая из этих схем замены может осуществляться принудительно, через заранее рассчитанные периоды времени, т. е. в «профилактическом» режиме, или по мере наступления допустимого износа. Каждая из схем замены инструмента имеет свои достоинства и недостатки, а также предпочтительные условия выполнения.

Функция цели для случая обработки однородным блоком с общими для всех инструментов значениями n и s формируется так же, как и при обработке одним инструментом. При раздельной схеме замены инструментов затраты

$$Z = E(\tau_{0.\text{лим}} + (M\tau_{oi}/T_i)), \quad (5.16)$$

где $\tau_{0.\text{лим}}$ — основное время работы лимитирующего инструмента;

$M = \sum_{i=1}^k (\tau_{c.i} + Z_{и}/E)_i$; k — число инструментов в блоке.

После несложных преобразований получим затраты

$$Z = E(A_{\text{лим}}/n + Gn^{\mu-1}), \quad (5.17)$$

где

$$G = \sum_{i=1}^k (M_i A_i (F_i / B_i)^\mu);$$

$$M_i = (\tau_{с.и} + Z_{и}/T)_i; \quad A_i = L_i/s;$$

$$F_i = \pi d_i/1000; \quad B_i = C_v/(t_i^x s^y).$$

Если приравнять нулю производную от Z по n , то получим оптимальную по экономическому критерию частоту вращения

$$n_{\text{опт.э}} = 1000 C_v / (\pi d_{\text{лим}} t_{\text{лим}}^x s^y T_{y,0}^m), \quad (5.18)$$

где

$$T_{y,0} = \sum_{i=1}^k (T_{\text{опт.э}i} \lambda_i (\eta_i \alpha_i^x)^\mu);$$

$$T_{\text{опт.э}i} = (\mu - 1)(\tau_{с.и} + Z_{и}/E)_i;$$

$$\lambda_i = L_i / L_{\text{лим}}; \quad \eta_i = d_i / d_{\text{лим}}; \quad \alpha_i = t_i / t_{\text{лим}};$$

$L_i, L_{\text{лим}}$ — длины i -й и лимитирующей ступеней; $d_i, d_{\text{лим}}$ — диаметры i -й и лимитирующей ступеней; $t_i, t_{\text{лим}}$ — глубина резания на i -й и лимитирующей ступенях; $T_{y,0}$ можно считать условно-оптимальной стойкостью блока. Тогда

$$n_{\text{опт.э}} = 1000 C_v / (\pi d_{\text{лим}} T_{y,0}^m t_{\text{лим}}^x s^y). \quad (5.19)$$

При групповой схеме замены инструментов блока ограничением по стойкости блока будет тот инструмент, для которого произведение $d_i t_i^x L_i^m$ максимально. Этот инструмент является лимитирующим по стойкости. В данном случае функция цели имеет вид

$$Z = E(\tau_{о.лим} T + M_1 \tau_{о.лим} T / T_{\text{лим}} T),$$

где $\tau_{о.лим} T, T_{\text{лим}} T$ — соответственно основное время и стойкость инструмента, лимитирующего стойкость блока; $M_1 = \tau_{сб} + \sum_{i=1}^k (Z_{иi} / E)$; $\tau_{сб}$ — время замены и размерной настройки инструментов блока. Тогда по аналогии с выражением (5.19) получаем

$$n_{\text{опт.э}} = 1000 C_v / (\pi d_{\text{лим}} T t_{\text{лим}}^x T s^y T_{\text{лим}}^m T), \quad (5.20)$$

где $T_{\text{лим}} T$, как и в формуле (5.18), можно считать условно-опти-

мальной стойкостью блока, равной стойкости лимитирующего по стойкости инструмента ($T_{y.0} = T_{\text{лим}} T$) и определять по следующему выражению:

$$T_{y.0} = T_{\text{лим}} T = (\mu - 1)L_{\text{лим}} T M_1 / L_{\text{лим}}.$$

Поскольку затраты на эксплуатацию блока инструментов существенно больше, чем на один инструмент, то оптимальная частота вращения заготовки смещается в сторону меньших значений, где линейная зависимость между $\ln T$ и $\ln v$ нарушается. Чтобы избежать значительной ошибки при определении $n_{\text{опт.э}}$ по формуле (5.20), необходимо использовать формулу (5.6) стойкости, и тогда получим следующее выражение:

$$n_{\text{опт.э}} = 1000 C_v M_2^m / (\pi d_{\text{лим}} t_{\text{лим}}^x s_{y.0}^m),$$

где $M_2 = 1 + w / (\mu - 1)$; $w = \sum_{i=1}^k (T_{\text{опт.э}i} / T_{\text{пред}i})$; $T_{\text{опт.э}i}$, $T_{\text{пред}i}$ — соответственно оптимальная по экономическому критерию и предельная (при скорости резания, приближающейся к нулю) стойкости i -го инструмента блока.

При обработке однородным блоком с общей минутной подачей (см. рис. 5.8,а) в функцию цели (5.16) следует подставить:

$$\tau_{0i} = L_i / s_{\text{мин}}; T_i = (B_i / s_{\text{мин}})^\mu,$$

где $s_{\text{мин}} = s_i n_i$; $B_i = 1000 C_v s_i^{1-y} / (\pi d_i^{1-q} t_i^x)$.

Тогда получим

$$s_{\text{мин.опт.э}} = 1000 C_v s_{\text{лим}}^{1-y} / (d_{\text{лим}}^{1-q} t_{\text{лим}}^x T_{y.0}^m), \quad (5.21)$$

где

$$T_{y.0} = \sum_{i=1}^k (\mu - 1) M_i H_i^\mu; M_i = \lambda_i (\tau_{c.и} + 3_{и}/E)_i;$$

$$H_i = \pi_i^{1-q} \alpha_i^x / \sigma_i^{1-y}; \pi_i = d_i / d_{\text{лим}};$$

$$\lambda_i = L_i / L_{\text{лим}}; \alpha_i = t_i / t_{\text{лим}}; \sigma_i = s_i / s_{\text{лим}};$$

а индекс «лим» соответствует лимитирующему инструменту.

Оптимизация режима обработки в данном случае проводится в следующем порядке. Сначала назначается глубина t_i резания для

всех инструментов. При сверлении $t_i = d_i/2$, но $x = 0$. Исходя из силовых ограничений, определяют значения s_i . Затем по формуле (5.21) рассчитывают оптимальное по экономическому критерию значение минутной подачи ($s_{\text{мин.опт.э}}$). Частота вращения для каждого шпинделя определяется из выражения $n_{\text{опт.э}i} = s_{\text{мин.опт.э}}/s_i$.

5.5. Оптимизация режима обработки неоднородным блоком с общими частотой вращения и подачей

При оптимизации режима обработки неоднородным блоком с общими частотой вращения и подачей вместо выражения (5.17) для вычисления затрат можно использовать приведенную ниже формулу

$$Z = E(A_{\text{лим}}/n + \sum_{i=1}^k (A_i M_i F_i^{\mu_i} n^{\mu_i-1})), \quad (5.22)$$

где $A_i = L_i/s$; $M_i = (\tau_{\text{с.и}} + Z_{\text{и}}/E)_i$; $F_i = \delta_i/B_i$; $\delta_i = \pi d_i/1000$; $B_i = C_{\text{ви}}/(t_i^x s^y)$; μ_i для каждого инструмента имеет свое значение в пределах 2,5...12 и редко бывает целым числом.

Поэтому если приравнять нулю производную от Z по n , то получим многочлен

$$\sum_{i=1}^k ((\mu_i - 1) A_i M_i (F_i n)^{\mu_i}) = A_{\text{лим}},$$

из которого искомое значение n можно определить только одним из известных численных методов. В таких случаях лучше применять один из методов однофакторного поиска оптимума непосредственно по функции цели (5.22). Если частота вращения на станке может принимать ряд дискретных значений n_1, n_2, \dots, n_p , то быстрее всего приводит к цели метод поиска по дискретам с помощью чисел Фибоначчи, которые образуют ряд, где каждое последующее число F_j равно сумме двух предыдущих (F_{j-1} и F_{j-2}). Часть этого ряда имеет вид:

j	...	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
F_j	.....	1	2	3	5	8	13	21	34	55	89	144	233

Алгоритм поиска станет ясен из следующего примера. Допустим, коробка скоростей на станке обеспечивает 18 ступеней частот вращения. Выбираем ближайшее большее число Фибоначчи из приведенного ряда. Это $F_j = 21$, где $j = 7$. В данном случае для определения

$n_{\text{опт.з}}$ необходимо не более $j-1$ вычислений значений Z из функции цели (5.22) по схеме, показанной на рис. 5.9, где индекс p частоты вращения n_p , при которой вычисляется значение Z_p , определяется из ряда чисел Фибоначчи.

Начальный интервал неопределенности охватывает все 18 ступеней (ступени 19...21 считаются условными и прибавляются к действительным). Значения индекса частоты вращения для первых двух вычислений (рис. 5.9,а) определяются следующим образом. Выбирается число Фибоначчи, предшествующее F_j , которое в данном случае равно 13, и откладывается от границ интервала неопределенности. Получаем, что вычисления следует проводить при частотах вращения n_8 и n_{13} . Поскольку функция цели унимодальна (имеет один минимум), то, сравнивая полученные значения Z_1 и Z_2 , можно выделить новый (уточненный) интервал неопределенности. В данном случае, так как $Z_1 > Z_2$, новый интервал неопределенности охватывает ступени частот вращения от 8-й до 18-й.

Для определения очередной ступени берем из ряда следующее меньшее число Фибоначчи (в данном случае 8) и откладываем его от индекса, соответствующего большему значению Z , в сторону меньшего (рис. 5.9,б). Получаем, что вычисление следует проводить при частоте вращения n_{16} . Вычисленное значение $Z_3 > Z_2$, следовательно, интервал неопределенности сужается, охватывая ступени частот вращения от 8-й до 16-й.

Аналогично (рис. 5.9,в) определяем, что следующее вычисление следует проводить при частоте вращения n_{11} . Поскольку $Z_4 > Z_2$, то новый интервал неопределенности охватывает только ступени частот вращения от 8-й до 13-й. После следующего вычисления

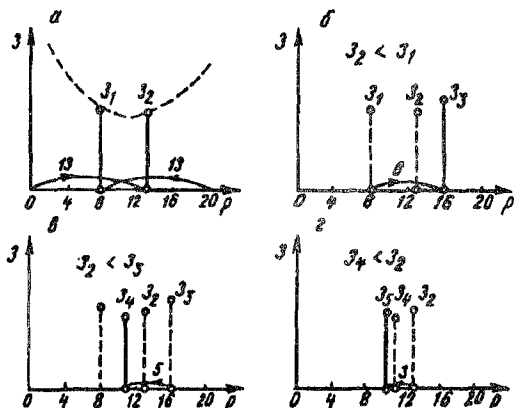


Рис. 5.9. Схемы поиска по дискретам с помощью чисел Фибоначчи

при частоте вращения n_{10} интервал неопределенности опять сужается (от 10-й до 13-й ступени). И, наконец, шестое вычисление при n_{12} окончательно показывает, что оптимальной будет частота вращения, соответствующая 11-й ступени коробки скоростей (рис. 5.9,з).

Аналогично можно проводить оптимизацию

режима обработки неоднородным блоком с общей минутной подачей. Необходимо только соответствующим образом изменить функцию цели.

Если n (или s_{\min}) на станке может принимать любые значения в заданном диапазоне, то поиск оптимальной частоты вращения (или минутной подачи) лучше проводить методом «золотого сечения». В данном случае начальный интервал неопределенности $L_0 = n_{\max} - n_{\min}$. Тогда $L_1 = L_2 = L_0/\tau$, где $\tau = 1,618$. А затем при последующих вычислениях

$$L_j = L_{j-1}/\tau, \quad (5.23)$$

где j — номер вычисления.

Для первых двух вычислений $n_1 = n_{\max} - L_1$, $n_2 = n_{\min} + L_2$. Затем, в зависимости от результатов вычисления L_j по формуле (5.23), определяют n_j , откладывая L_j от n , соответствующего большему значению Z , в сторону, соответствующую меньшему значению (рис. 5.10,а). После p вычислений интервал неопределенности сокращается до $L_p = L_0/\tau^{p-1}$. Зависимость L_p/L_0 от p показана на рис. 5.10,б.

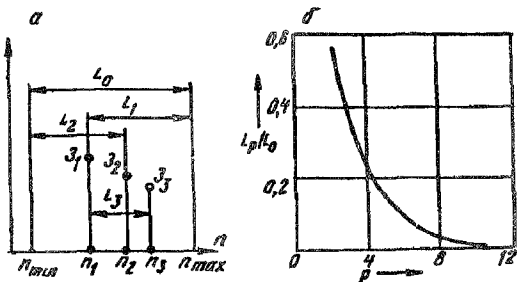


Рис. 5.10. Схема поиска методом «золотого сечения» (а) и зависимость интервала неопределенности от числа шагов (б)

5.6. Влияние временной структуры операции на ее эффективность

Базовым вариантом для сравнения эффективности будет однопериодическая операция, состоящая из одного инструментального перехода, когда в единственной рабочей зоне за один установ обрабатывается одна заготовка. Критерием эффективности в данном случае можно считать производительность или конкретные составляющие штучного времени. В качестве альтернативы рассматривают операции с концентрацией обработки, организованные либо путем последовательного совмещения инструментальных переходов (см. рис. 1.13,д), либо путем применения блочных переходов (см. рис. 5.8). Кроме того, рассмотрены операции с концентрацией заготовок в рабочей зоне (см. рис. 1.13,б) и двухзонные операции.

Предположим, что для обработки заготовки, согласно базовому

варианту, необходимо выполнить M операций. Тогда общее оперативное время $\tau_{оп.б}$ базового варианта можно определить по формуле

$$\tau_{оп.б} = \sum_{i=1}^M (\tau_y + \tau_{прxi} + \tau_{oi} (1 + \tau_{с.иi} / T_i)),$$

где τ_y — время установки заготовки (считаем для всех операций одинаковым); $\tau_{прxi}$ — часть вспомогательного времени, связанного с выполнением i -го перехода; τ_{oi} — основное время выполнения i -го перехода; $\tau_{с.иi}$ — время на смену затупившегося i -го инструмента; T_i — его стойкость.

При последовательном совмещении M переходов в операции заготовка будет устанавливаться только один раз. Тогда оперативное время альтернативного варианта

$$\tau_{оп.а} = \tau_y + \sum_{i=1}^M (\tau_{прxi} + \tau_{oi} (1 + \tau_{с.иi} / T_i)).$$

Индекс производительности $I_{пр}$ в данном случае можно записать так:

$$I_{пр} = \tau_{оп.б} / \tau_{оп.а} = (M\tau_y + \Pi) / (\tau_y + \Pi),$$

где

$$\Pi = \sum_{i=1}^M (\tau_{прxi} + \tau_{oi} (1 + \tau_{с.иi} / T_i)).$$

Зависимость индекса производительности от количества последовательно совмещенных переходов (которые условно считаются одинаковыми) и отношения затрат времени на один инструментальный цикл обработки к затратам времени на установку заготовки можно отразить выражением

$$I_{пр} = M(1 + \Pi_1 / \tau_y) / (1 + M\Pi_1 / \tau_y),$$

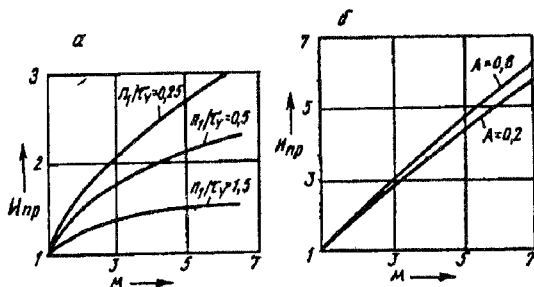


Рис. 5.11. Зависимость индекса производительности операции от уровня последовательной (а) и параллельной (б) концентрации переходов в операции

где $\Pi_1 = \tau_{\text{прх}} + \tau_0(1 + \tau_{\text{си}}/T)$. Эту зависимость отражают графики на рис. 5.11,а.

Если альтернативным вариантом является обработка инструментальным блоком из M инструментов, то

$$I_{\text{пр}} = \frac{M \tau_y + \Pi}{\tau_y + \tau_{\text{прх лим}} + \tau_{0 \text{ лим}}(1 + \tau_{\text{си лим}}/T_{\text{лим}})},$$

где индекс «лим» указывает на лимитирующий инструмент. Посчитав условно все инструментальные переходы одинаковыми, можем для данного случая записать:

$$I_{\text{пр}} = M(\tau_y + \Pi_{1б})/(\tau_y + \Pi_{1а}). \quad (5.24)$$

Учитывая, что оптимальная по производительности стойкость альтернативного варианта $T_{\text{опт а}} = MT_{\text{опт б}}$, а отношение скоростей резания, согласно выражению (5.12),

$$v_{\text{опт б}}/v_{\text{опт а}} = (T_{\text{опт а}}/T_{\text{опт б}})^m = M^m,$$

по формуле (5.24) получим

$$I_{\text{пр}} = M(A(1 - m) + 1)/(A(1 - m) + M^m(1 - m + m/M)),$$

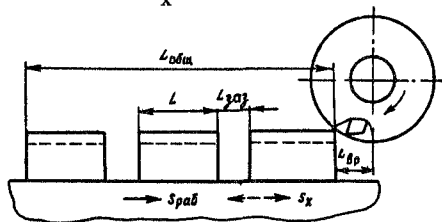
где $A = (\tau_y + \tau_{\text{прх}})/\tau_{0б}$; $\tau_{0б}$ — время обслуживания станка. Результаты расчета по данной модели приведены на рис. 5.11,б.

Сравнение графиков на рис. 5.11 позволяет сделать следующие выводы: 1) эффективность параллельного совмещения переходов значительно выше, чем последовательного; 2) последовательное совмещение переходов достаточно эффективно только тогда, когда время на установку заготовки существенно (в 2...4 раза) превышает затраты времени на выполнение одного инструментального перехода (без учета τ_y); 3) влияние параметра A незначительно

При последовательном совмещении заготовок (рис. 5.12) оперативное время определяется выражением

$$\tau_{\text{оп а}} = \tau_y + \frac{L_{\text{общ}}(1/s_{\text{раб}} + 1/s_x)}{k} + \frac{2L_x}{s_x},$$

Рис 5.12 Расчетная схема операции с последовательным совмещением заготовок



где $L_{\text{общ}} = kL + (k-1)L_{\text{заз}} + L_{\text{вр}}$; k — количество заготовок; $s_{\text{раб}}$, s_x — рабочая и холостая минутные подачи; L_x — добавочный холостой ход; L — длина фрезеруемой поверхности; $L_{\text{заз}}$ — зазор между обрабатываемыми поверхностями; $L_{\text{вр}}$ — длина врезания.

А при обработке одной заготовки ($k = 1$)

$$\tau_{\text{оп.б}} = \tau_y + (L + L_{\text{вр}}) (1/s_{\text{раб}} + 1/s_x) + 2L_x/s_x.$$

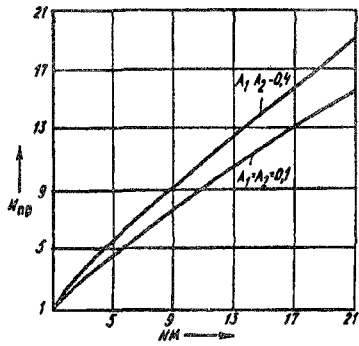
После несложных преобразований из последних уравнений получим

$$I_{\text{пр}} = 1/(1 - A_1/A_2), \quad (5.25)$$

где $A_1 = (k-1)(K_{\text{вр}} - K_{\text{заз}})/k$; $A_2 = X + (1 + K_{\text{вр}})$; $X = (K_s K_y + 2K_x) / (1 + K_s)$; $K_{\text{вр}} = L_{\text{вр}}/L$; $K_{\text{заз}} = L_{\text{заз}}/L$; $K_s = s_x/s_{\text{раб}}$; $K_x = L_x/L$; $K_y = \tau_y s_{\text{раб}}/L$.

Результаты расчетов по модели (5.25), показанные на рис. 5.13, позволяют сделать следующие выводы: 1) последовательное совмещение заготовок достаточно эффективно, когда длина врезания намного больше длины детали; 2) зазоры между заготовками сильно снижают эффективность последовательного совмещения; 3) значительно снижает эффективность последовательного совмещения заготовок увеличение параметра X , характеризующего относительную

Рис 5.14 Зависимость индекса производительности от уровня концентрации переходов в двухзонной периодической операции и от параметров вспомогательных переходов



N рабочих позиций, в каждой из которых выполняется M одинаковых инструментальных переходов. Тогда

$$I_{\text{пр}} = G_1 / G_2,$$

где $G_1 = 1 + (A_1 + A_2)(1 - m)$; $G_2 = A_2(1 - m) + (NM)^m(1 - m + m/(NM))$; $A_1 = \tau_y / \tau_{об}$; $A_2 = \tau_{\text{прх}} / \tau_{об}$.

Результаты расчета по данной модели, приведенные на рис. 5.14, показывают, что эффективность операций с такой структурой значительно возрастает с увеличением уровня концентрации переходов. Влияние параметров A_1 и A_2 незначительно.

5.7. Автоматическая оптимизация режимов резания

В рассмотренных выше алгоритмах оптимизации режимов резания не учитывались зависимость параметров моделей ограничений от времени работы инструмента после его заточки и стохастический характер процесса изнашивания (и разрушения) инструмента. Однако на самом деле при затуплении инструмента увеличиваются как параметр шероховатости Ra , так и составляющие силы резания (рис. 5.15). Следовательно, с увеличением времени работы инструмента границы области допустимых значений подачи

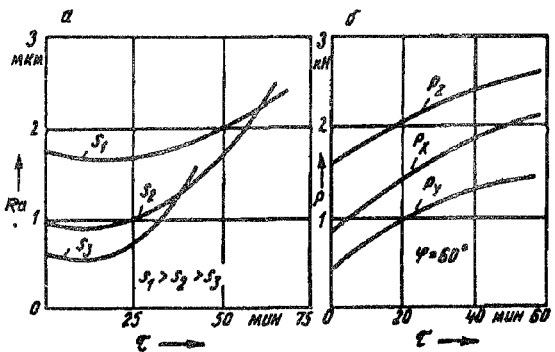


Рис 5.15 Зависимость параметра Ra шероховатости (а) и сил P резания (б) от времени τ работы инструмента после переточки

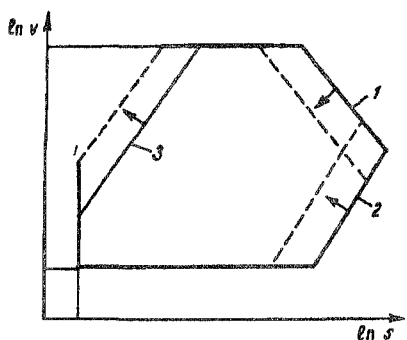


Рис. 5.16. Схема изменения области допустимых значений s и v из-за затупления инструмента:

1 — ограничение по мощности; 2 — ограничение по прочности инструмента; 3 — ограничение по шероховатости

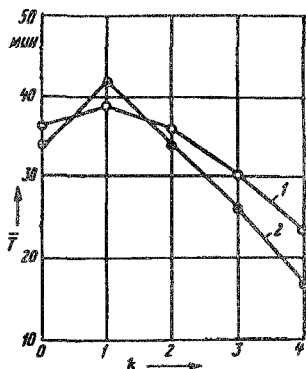


Рис. 5.17. Зависимость средней стойкости T инструмента от номера переточки:

1 — для проходных резцов; 2 — для отрезных резцов

после первой или, реже, после второй переточки. Число переточек, которое допускает инструмент, зависит от его прочности и нагрузки во время работы и при предварительной обработке обычно в 2-8

s и скорости v резания будут смещаться, как это показано на рис. 5.16. Таким образом, при предварительной обработке, когда ограничением является мощность привода главного движения, необходимо по мере затупления инструмента уменьшать подачу и скорость резания. Если ограничением является прочность инструмента, то по мере затупления необходимо уменьшать подачу. А при чистовой обработке, когда ограничением является заданное значение параметра Ra шероховатости, по мере затупления инструмента необходимо уменьшать подачу и (или) увеличивать скорость резания.

Исследования показали, что отказ инструмента, возникающий в связи с достижением предельного износа в результате выкрашивания, скалывания или разрушения режущей пластины, подчиняется закону Вейбулла. Параметры этого распределения существенно изменяются от переточки к переточке. Так, средняя стойкость переточенного инструмента может различаться в пределах двух раз (рис. 5.17). Средняя стойкость максимальна

качества возможна только с помощью автоматизированной (автоматической) системы управления (АСУ), в которую поступает по каналам обратной связи информация из зоны резания. На рис. 5.18 приведена схема классификации АСУ режимами резания. АСУ могут быть одно- и многопараметрическими (соответственно АСУО и АСУМ). Анализ показал, что возможны взаимосвязанные или независимые контуры управления частотой вращения шпинделя и подачей.

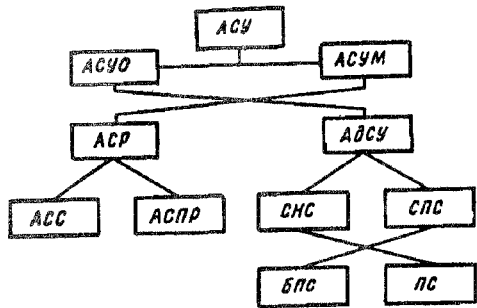


Рис. 5.18. Схема классификации АСУ режимами резания

Автоматические системы регулирования (АСР) в зависимости от характера задающего воздействия делятся на автоматические системы стабилизации (АСС) и автоматические системы программного регулирования (АСПР). Автоматические системы управления, управляющие воздействия, параметры, структура и алгоритм работы которых автоматически изменяются в зависимости от реальных условий так, чтобы обеспечить экстремальное (или близкое к нему) значение выбранного критерия, получили название *адаптивных систем* (АДСУ). Дополнительными признаками АДСУ являются неполный детерминизм (неопределенность), избыточность, прогнозирование и самообучение. АДСУ делятся на *самонастраивающиеся* (СНС), в которых изменяются управляющие воздействия или параметры, и *самоприспосабливающиеся* (СПС), в которых изменяется структура или алгоритмы работы. СНС и СПС в свою очередь делятся на *беспоисковые* (БПС) и *поисковые* (ПС). Последние характеризуются изменением воздействий, параметров или алгоритма управляющего устройства в результате анализа результатов пробных обработок.

По каналам обратной связи в АСУ режимами резания должна поступать информация о фактическом значении параметров технических ограничений (силы, момента, мощности) и (или) фактической скорости изнашивания (и состоянии) режущей кромки инструмента. Исследования показали, что: 1) скорость изнашивания определяется в основном температурой на передней и задней поверхностях режущего клина; 2) для каждого сочетания материалов заготовки и инструмента при работе на любой подаче существует скорость резания, которой соответствует минимальная скорость изнашивания; 3) сочетаниям параметров режима резания (s и v_m), обеспечивающим для данной пары материалов заготовки и инстру-

мента минимальное значение относительного поверхностного износа $h_{0п}$, соответствует постоянная температура резания θ_m (рис. 5.19). Значение $h_{0п}$ определяется по формуле

$$h_{0п} = 100h / (Ls) \text{ (мкм/(1000 см}^2\text{))},$$

где h — износ, накопленный за определенный промежуток времени; L — путь, пройденный инструментом в материале за тот же отрезок времени; s — подача.

Температура резания оценивается по термо-ЭДС (E) естественной термопары, образуемой материалами заготовки и режущей пластины. Каждой паре материалов заготовки и инструмента соответствует своя градуировочная кривая. Значение температуры θ_m (или соответствующее значение E) можно определить не только с помощью трудоемких стойкостных испытаний (рис. 5.19), но и косвенным путем.

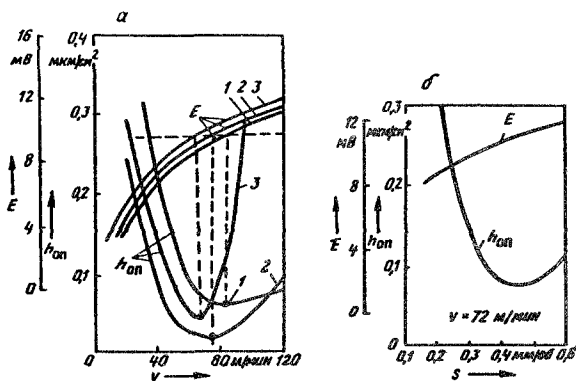


Рис. 5.19. Зависимость термо-ЭДС E и относительного износа $h_{0п}$ от скорости v резания (а) и подачи s (б):
 1 — $s = 0,03$ мм/об;
 2 — $s = 0,06$ мм/об;
 3 — $s = 0,12$ мм/об

Так, исследования показали, что θ_m может быть равна: 1) температуре начала рекристаллизации материала заготовки; 2) температуре провала пластичности материала заготовки; 3) температуре максимального электросопротивления материала заготовки; 4) температуре точек Кюри для инструментального материала; 5) температуре, соответствующей равенству температур на передней и задней гранях режущего клина; 6) температуре, соответствующей максимальному значению амплитуды электромагнитного излучения, которое возникает при облучении нагретой пластины инструментального материала лазером, работающим в режиме коротких импульсов; 7) температуре, соответствующей максимальному значению $d\theta/dv$. Данная информация позволяет существенно снижать трудоемкость экспериментов для определения значения θ_m .

Температура резания θ_m оптимальна по размерной стойкости инструмента, но не оптимальна по экономическому критерию. Чтобы определить температуру резания $\theta_{\text{опт.э}}$, оптимальную по экономическому критерию, необходимо подставить в выражение (5.8) приведенные ниже зависимости температуры от скорости резания и стойкости от температуры резания:

$$\begin{aligned} \theta &= \theta_m (v/v_m)^r; \\ T &= T_m (\theta_m/\theta)^k. \end{aligned} \quad (5.26)$$

Тогда, приравняв нулю $dZ/d\theta$, получим

$$\theta_{\text{опт.э}} = \theta_m (T_m / ((rk - 1)(\tau_{с.и} + Z_{и}/E)))^{1/k}, \quad (5.27)$$

где $r = 0,3 \dots 0,5$; $k = 11 \dots 12$. Расчеты показали, что оптимальная по экономическому критерию температура $\theta_{\text{опт.э}} = (1,02 \dots 1,12)\theta_m$.

Полученная любым из указанных выше способов информация о значении θ_m может быть использована в автоматической системе стабилизации, схема которой показана на рис. 5.20. Сигнал термо-ЭДС (E), пропорциональный фактической температуре резания, и сигнал задающего устройства ЗУ (уставка) $E_{\text{опт}}$, пропорциональный $\theta_{\text{опт.э}}$, сравниваются

в устройстве сравнения СУ, и на усилитель У передается сигнал $\Delta E = E_{\text{опт}} - E$. Исполнительное устройство привода ИУ изменяет частоту вращения шпинделя так и до тех пор, пока значение ΔE не станет равным нулю. Таким образом, на любой ступени поддерживается постоянная оптимальная скорость резания. При этом компенсируются вариации твердости заготовки. Использование АСС температуры обеспечивает повышение технологической производительности по сравнению с традиционным способом назначения частоты вращения заготовки по ее максимальному диаметру. Однако по сравнению с методом оптимизации режимов резания, рассмотренным в § 5.3, эффект повышения технологической производительности от применения АСС температуры не так высок (не более 5%). Наиболее эффективны АСС температуры при торцовом точении на токарно-карусельных станках заготовок со значительной разницей наружного и внутреннего диаметров.

Необходимость в стабилизации мощности возникает в тех случаях, когда в течение цикла условия работы инструмента сущест-

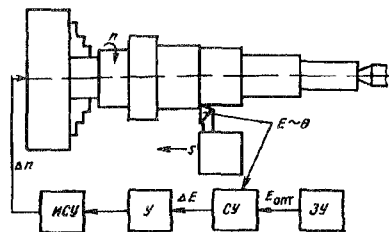


Рис. 5.20. Схема автоматической системы стабилизации температуры резания

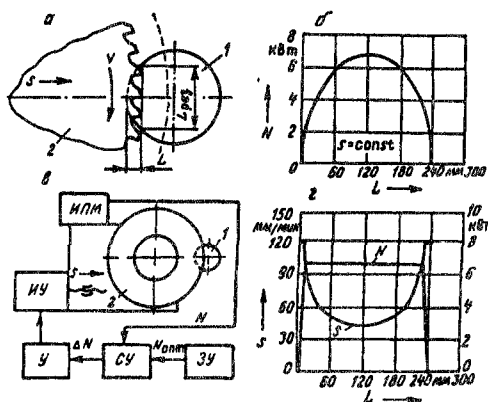


Рис 5.21 Схема автоматической стабилизации мощности фрезерно-отрезного станка

изменяет подачу (рис. 5.21,г), чтобы эффективная мощность привода главного движения была постоянной. Для этого значение N , определенное измерительным преобразователем (датчиком) мощности ИПМ, сравнивается в устройстве сравнения СУ с сигналом задающего устройства ЗУ, а исполнительное устройство ИУ так и до тех пор изменяет подачу, пока разность $\Delta N = N_{\text{опт}} - N$ не станет равной нулю.

Аналогичная система может быть использована для управления подачей на станках для глубинного шлифования пазов. Она особенно эффективна, когда длина паза $L \leq 2L_{\text{вр}}$, где $L_{\text{вр}}$ — длина врезания. Расчеты показали, что в таком случае технологическая производительность возрастает на 25...40%.

Среди самоприспосабливающихся систем наиболее распространенными являются системы экстремального регулирования (СЭР). Они осуществляют автоматический поиск и сохранение на требуемом уровне такого значения регулирующего воздействия (v и (или) s), при котором критерий оптимальности достигает максимального или минимального значения. На основании зависимостей (5.8), (5.26) и (5.27) легко получается выражение для экономического критерия оптимальности J :

$$J = \frac{1 + (\theta/\theta_{\text{опт}})^k / (rk - 1)}{vs}$$

С увеличением скорости резания v и подачи s , с одной стороны, непосредственно уменьшается значение критерия оптимальности, но, с другой стороны, это ведет к увеличению температуры резания θ и, следовательно, к увеличению J . Значит, существует такая

венно изменяются. Например, на фрезерно-отрезном станке по мере врезания в заготовку изменяется длина реза $L_{\text{рез}}$ (рис. 5.21,а), что приводит к существенному изменению нагрузки на инструмент и эффективной мощности N (рис. 5.21,б). На большей части пути резания L с постоянной подачей возможности инструмента и станка недоиспользуются. Система автоматической стабилизации мощности, схема которой показана на рис. 5.21,в, так

совокупность значений v и s , при которой J принимает минимальное значение.

СЭР токарного станка, схема которой показана на рис. 5.22, *а*, обеспечивает автоматическую минимизацию критерия оптимальности J за счет подсистемы стабилизации температуры (управление подачей) и поиска такой частоты вращения шпинделя, при которой эффективная мощность, а следовательно, и пропорциональная ей технологическая производительность (vs), будут максимальными.

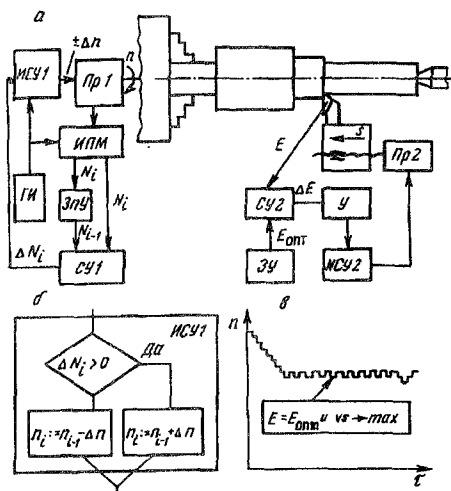


Рис. 5.22. Схема системы экстремального регулирования токарного станка

На станке имеется отдельный привод главного движения (Пр1) и отдельный привод подачи (Пр2). Подсистема стабилизации температуры в устройстве сравнения СУ2 сравнивает сигнал E , пропорциональный фактической температуре резания, с сигналом задающего устройства ЗУ, а его исполнительное устройство ИСУ2 изменяет подачу, поддерживая равенство $\theta = \theta_{опт.э}$.

Подсистема поиска по сигналам генератора импульсов ГИ с помощью измерительного преобразователя мощности ИПМ замеряет фактическую мощность резания N_i , соответствующую i -му такту ГИ. Этот сигнал передается в запоминающее устройство ЗпУ и устройство сравнения СУ1. В момент подачи N_i в ЗпУ содержащееся в нем предыдущее значение N_{i-1} передается в СУ1, где сравнивается с N_i . Полученная разность ΔN_i передается в исполнительное устройство ИСУ1, которое, в зависимости от знака ΔN_i , увеличивает или уменьшает частоту вращения шпинделя (рис. 5.22, б). Изменение частоты вращения ведет к изменению температуры резания и, следовательно, к изменению подачи. Схема изменения частоты вращения шпинделя в процессе поиска и «стабильной» работы показана на рис. 5.22, в.

Кроме поиска методом последовательных шагов, применяемого в рассмотренной СЭР, используют метод «золотого сечения» (см. рис. 5.10) и метод поиска по дискретам (см. рис. 5.9).

Использование сигналов вибрационного смещения и (или) виброакустической эмиссии для диагностики состояния режущей кромки инструмента и автоматической оптимизации режима резания является развивающимся и перспективным направлением в технологии

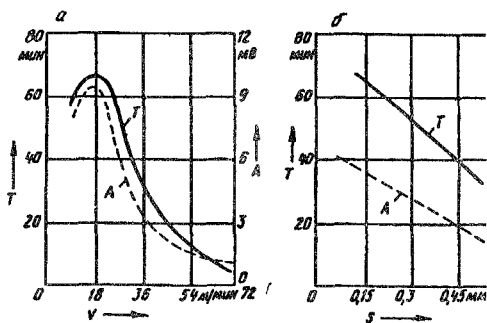


Рис. 5.23. Зависимость стойкости T инструмента и сигнала A , пропорционального амплитудного распределения сигналов акустической эмиссии, от скорости резания v (а) и подачи s (б) при точении

машиностроения. Исследования показали, что по мере изнашивания инструмента растет амплитуда относительного вибро смещения инструмента и дисперсия амплитудного распределения сигналов виброакустической эмиссии. А мода амплитудного распределения сигналов виброакустической эмиссии (A) может быть параметром, характеризующим стойкость инструмента (рис. 5.23). Графики на данном рисунке доказывают достаточную информативность этого параметра.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. В каких случаях последовательная концентрация усилий обеспечивает...

шественное сокращение машинного времени?

2. Какое сокращение машинного времени обеспечивается при последовательной...

6

МЕТОДИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

6.1. Общие положения

Проектирование технологических процессов в машиностроении преследует одну из следующих целей: 1) подготовка производства новой машины в рамках заданной (действующей) производственной системы; 2) совершенствование технологического процесса изготовления данной машины или ее типовых элементов в

рамках действующей системы; 3) технологическое обоснование технического предложения на производственную систему или ее элементы (механосборочный цех либо его отделение, автоматическая линия, агрегатный станок и т. д.). Методы, средства и результаты достижения указанных целей зависят от типа производства.

Подготовка производства новой машины состоит из следующих этапов: 1) анализ исходных данных; 2) разработка технологического процесса сборки; 3) разработка технологических процессов изготовления деталей; 4) проектирование специальных инструментов, приспособлений и технологического оборудования; 5) изготовление специальных инструментов, приспособлений и оборудования; 6) внедрение технологического процесса. В обязанности технологов

ского анализа типовой производственной программы — выявление унифицированных, нормализованных и стандартных элементов машин, подлежащих изготовлению, определение их количества; установление объектов групповой обработки и сборки; разработка перспективного плана применения новых технологических процессов сборки и механической обработки; составление проектных заданий на разработку устройств для механизации и автоматизации групповых и типовых операций сборки, обработки и контроля.

К *основным материалам* для проектирования технологических процессов сборки и обработки относятся: 1) производственное задание на год с указанием ассортимента и номенклатуры машин, запланированных к изготовлению, с разбивкой по месяцам; 2) сборочные чертежи машин и сборочные единицы; спецификации и рабочие чертежи деталей; 3) технические требования к машинам, подлежащим изготовлению; 4) паспортные данные об оборудовании для обработки и сборки, которое имеется на предприятии.

К *руководящим материалам* для проектирования технологических процессов относятся государственные стандарты (ГОСТы), отраслевые и заводские стандарты (ОСТы и СТП) на материалы, инструменты, приспособления и технологическое оборудование, технологические нормалы, режимы и нормативы, типовые технологические процессы и производственные инструкции.

Вспомогательные материалы — это справочники, альбомы применяемого технологического оснащения по аналогичным или родственным машинам, отчеты научно-исследовательских институтов, вузов и лабораторий.

Одной из основных задач анализа исходных данных является технологический контроль конструкторской документации на соответствие требованиям технологичности. Под *технологичностью конструкции* понимают совокупность придаваемых конструктором машине и ее элементам свойств, которые позволяют достигать оптимальных затрат ресурсов при изготовлении машины в соответствии с заданными показателями ее качества, объема выпуска и условий производства. Основными методами технологического контроля конструкторской документации являются: 1) сравнение с изделием-аналогом, подобранным из числа находящихся в серийном производстве; 2) сравнение с типовой и комплексной конструкцией; 3) сопоставление конструкции изделия с нормативно-технологическими требованиями к нему; 4) оценка на основе опыта технолога.

При отсутствии изделий-аналогов, подобных анализируемому по геометрической форме и параметрам качества, иногда достаточно ограничиться подбором аналога, имеющего подобие только по отдельным элементам. В некоторых случаях заключение по техно-

логичности одного элемента может быть достаточным для принятия решения по конструкции изделия в целом.

Типовой называют конструкцию представителя определенной классификационной группы деталей (сборочных единиц), близких по своему конструктивному исполнению. Типовым конструкциям соответствуют обычно типовые технологические процессы.

В зависимости от характеризующих свойств различают следующие показатели технологичности конструкции изделия (ТКИ): 1) показатели технологической рациональности конструкции; 2) показатели преемственности конструкции изделия; 3) показатели ресурсоемкости (трудоемкости, материалоемкости и т. д.) изделия.

Показатели технологичности могут быть качественными и количественными. В первом случае на основе сравнения дается оценочная характеристика типа «хорошо», «плохо» или «рационально».

ектирования технологического процесса является его описание по установленной ГОСТом форме. Данное описание содержит два вида сведений — структурные и параметрические (см. § 1.2). К *структурным* относятся сведения о действиях над объектом производства, т. е. о характере действий и порядке их выполнения. Кроме того, к структурным относятся сведения о применяемых на каждом этапе технологическом оборудовании, приспособлениях и инструментах. Если в результате воздействия на объект производства изменяется его форма (при механической обработке) или состав (при сборке), то сведения об этом в виде кодов или операционных эскизов также можно считать структурными.

К *параметрическим* относятся сведения о значениях размеров, допусков и посадок, шероховатости, допустимых отклонениях формы и относительного положения элементов объекта производства на каждом этапе технологического процесса, а также сведения о параметрах режима работы технологического оборудования для каждого инструмента. И обобщающими являются параметрические сведения о затратах времени и денег на изготовление машины и ее элементов на каждом из этапов технологического процесса.

Технологический процесс изготовления машины является дискретным. Иерархическая классификация его элементов при изготовлении деталей машин приведена в § 1.4. Технологический процесс сборки также делится на операции, которые выполняются над одной или несколькими сборочными единицами разной степени сложности одним или несколькими рабочими непрерывно на одном рабочем месте. Как и в других технологических процессах, сборочная операция является основной единицей производственного планирования.

Установом при сборке называют часть операции, которая выполняется при неизменном положении базовой детали (сборочной единицы) относительно приспособления. На сборочном станке может быть также несколько рабочих позиций.

Переходом сборочного процесса является часть операции, выполняемой над определенным местом соединения при использовании одного и того же приспособления и инструмента при неизменном способе (режиме) выполнения работы. Переход — самая мелкая часть технологического процесса, сохраняющая еще все его свойства.

Прием представляет собой законченную совокупность отдельных движений в процессе выполнения сборки или при подготовке к ней. Но он не является законченной частью технологического процесса.

В общем случае любой переход состоит из следующих этапов: 1) подача деталей к месту сборки; 2) взаимная ориентация деталей; 3) сопряжение деталей; 4) закрепление деталей; 5) контроль; 6) сьем собранного узла (или транспортирование на последующий переход либо операцию).

В общей постановке проектирование технологических процессов представляет собой сложную задачу, для решения которой необходимо разбиение последней на связанную и логически завершенную совокупность более простых локальных технологических задач. Эти задачи можно разделить на две группы: 1) *расчетные задачи*; 2) *задачи выбора*. Примером задачи, относящейся к первой группе, будет оптимизация режимов резания, а ко второй — выбор метода и способа обработки.

Выбор осуществляется из конечного множества известных типовых решений с учетом комплекса условий применимости. Типовые решения подразделяют на две группы: локальные и полные. *Локальные типовые решения* относятся к частным технологическим задачам, определяющим лишь некоторую часть (элемент) проектируемого технологического процесса, например назначение модели станка для выполнения операции. *Полные типовые решения* охватывают весь круг решаемых задач. Примером полного типового решения является типовой технологический процесс.

Локальные типовые решения различаются по структуре. Простейшим является *одноэлементное* решение, например модель станка или типоразмер инструмента. Такие типовые решения — неизменный элемент структуры технологического процесса, который может быть принят или не принят целиком. *Многоэлементные* локальные типовые решения состоят из некоторой совокупности элементов. Типовые решения в процессе дальнейшего проектирования могут изменяться. Примером многоэлементного локального решения служит типовой маршрут обработки отдельной поверхности или даже функционального модуля поверхностей детали. В процессе проектирования в зависимости от условий некоторые элементы этого решения могут исключаться или заменяться другими. Так как полное типовое решение тоже является многоэлементным, то и оно в результате анализа конкретных условий может видоизменяться.

6.2. Проектирование технологических процессов сборки

6.2.1. Требования к технологичности конструкции при сборке

На технологичность конструкции сборочной единицы влияют разнообразные факторы, важнейшими из которых являются: конструктивно-технологические свойства сборочной единицы и входящих в нее элементов, свойства средств технологического оснащения сборочных работ и производственные условия сборки.

Сборочные единицы различных уровней называют *агрегатами*, *комплектами*, *узлами* и *подузлами* (рис. 6.1). Членение машины

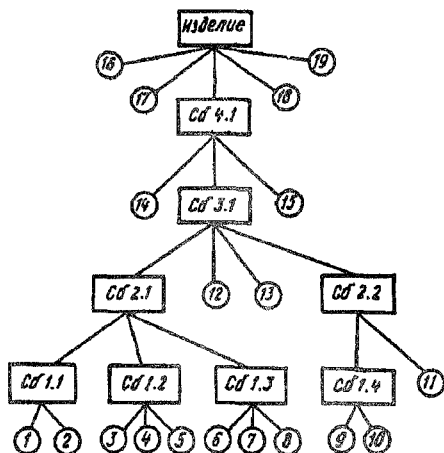


Рис. 6.1. Схема расчленения насоса для густого смазочного материала (О — детали; □ — сборочные единицы разных уровней)

на сборочные единицы и детали вызывается как конструктивными соображениями, так и требованиями производства. Членение изделия на составные части обеспечивается разъемами и стыками, которые по основному функциональному назначению разделяются на конструктивные и технологические. Последние создаются из соображений, оптимизирующих процессы сборки и изготовления деталей и сборочных единиц. Разъемы выполняются с использованием различных видов разъемных соединений (резьбовых, клиновых, шпоночных и т. д.), а стыки — неразъемных. При этом разъемы должны быть доступными для

выполнения требуемых операций обработки и сборки.

При расчленении машины на сборочные единицы должны выполняться следующие требования: 1) сборочная единица в процессе комплектации и образования не должна требовать разборки, а также разборки входящих в нее составных частей; 2) сборочные единицы, отдельные части которых входят в различные агрегаты (сборочные единицы высшего порядка), должны расчленяться таким образом, чтобы одна сборочная единица входила хотя бы в один агрегат; 3) сборочная единица выделяется в обязательном порядке, если по мере ее комплектования составными частями возникает необходимость изменения базы (базовой детали) для сборки; 4) сборочная единица должна образовываться на основе применения одного способа соединения (нельзя совмещать сварку, склеивание и сборку с натягом); 5) ввод составных частей в сборочную единицу (агрегат) должен производиться по принципу наименьшего пути, при этом исполнительные звенья сборочной единицы должны соединяться наименьшим числом деталей; 6) число деталей, входящих в одну сборочную единицу, должно быть от 2 до 5 шт. при полуавтоматизированной сборке и от 4 до 8 шт. при автоматизированной сборке с применением роботов; 7) операции пригонки, совместной обработки и регулировки допускаются в зависимости от типа производства и возможности достижения заданной точности замыкающего звена.

Так, в единичном и мелкосерийном производстве допустимы сложные выверки и пригонки, а также сверление по месту. В

серийном производстве допустимы несложные выверка и пригонка. Объем работ при сверлении по месту должен быть сведен к минимуму. В крупносерийном производстве пригоночные работы допустимы, а сверлильные работы по месту допускаются как исключение. В массовом производстве пригоночные работы недопустимы.

Трудоемкость пригоночных и доделочных работ может быть уменьшена путем рационального выбора компенсаторов, исключающих необходимость промежуточной сборки, или замены подгонки регулировкой. Трудоемкость сборки можно снизить, если исключить «закрытый» монтаж деталей и сборочных единиц, так как такая сборка не позволяет осуществлять контроль и регулировку.

Детали сборочной единицы можно разделить на базовую, комплектующие и соединительные. Чаще всего к базовым относят корпусные детали, связывающие в единое целое отдельные элементы сборочной единицы. Но функцию базовой может выполнять любая деталь сборочной единицы, имеющая наибольшие габаритные размеры. Базовая деталь считается технологичной для сборки, если она имеет явно выраженные базы достаточного размера, позволяющие ей занимать во время сборки устойчивое и неизменное положение, и если она не деформируется под действием рабочих сборочных нагрузок. Желательно, чтобы при сборке базовая деталь обеспечивала монтаж комплектующих деталей и выполнение всех других технологических переходов без изменения своего положения в пространстве, т. е. за одну установку. Целесообразно, чтобы при этом комплектующие детали свободно устанавливались на базовую сверху простым прямолинейным движением рабочего инструмента.

Всем деталям собираемых изделий необходимо придать конфигурацию, облегчающую их ориентацию, базирование, транспортирование и соединение. Для последнего сопрягаемые поверхности деталей снабжаются заходными фасками и (или) направляющими элементами (рис. 6.2). Шпоночные (рис. 6.2, д, е) и шлицевые соединения менее технологичны, чем цилиндрические или конические соединения с натягом, но последние могут передавать значительно меньший крутящий момент.

В зависимости от конструкции сборочной единицы возможны следующие системы сборки: 1) осевая, при которой части сборочной единицы соединяются в направлении,

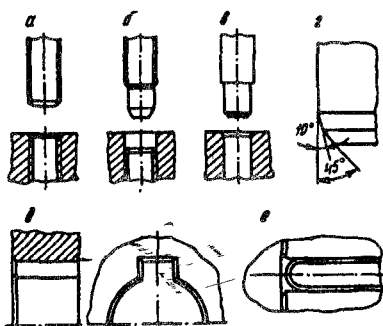


Рис. 6.2. Технологичные конструкции заходных поверхностей соединяемых деталей в соединениях:

а, б — резьбовых; в, г — гладких цилиндрических; д, е — шпоночных

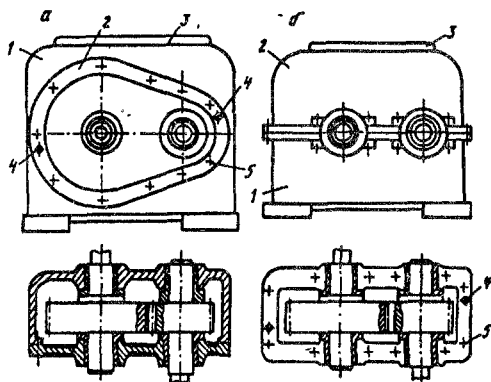


Рис. 6.3. Конструкции редукторов, позволяющих осуществлять осевую (а) и поперечную (б) системы сборки

совпадающем с осью ротора; 2) поперечная (радиальная), при которой части сборочной единицы соединяются в направлении, поперечном направлению оси (осей) ротора; 3) смешанная (поперечно-осевая), при которой используются два направления соединения элементов сборочной единицы.

На рис. 6.3 в качестве примера изображены конструкции одноступенчатых редукторов, позволяющих осуществлять осевую и поперечную системы сборки. В первом случае валы, собранные с шестернями и подшипниками, монтируют в корпусе 1 за счет их движения вдоль оси. Затем монтируется крышка 2 (также движением, параллельным оси валов), которая ориентируется штифтами 4. Крепление производится болтами 5. Смотровой люк 3 позволяет осуществлять проверку зацепления на краску. Во втором случае за счет проходящей через оси валов плоскости разъема корпуса 1 и крышки 2 возможен монтаж валов, собранных с подшипниками и шестернями, путем перемещения валов перпендикулярно к плоскости разъема.

Поперечная сборка обычно удобнее осевой, так как обеспечивает агрегатность (в корпус монтируется сборочная единица более низкого уровня) и лучший доступ для регулировки. Однако изготовление корпусной детали при этом несколько усложняется, так как необходима тщательная обработка стыка. Применение мягких уплотняюще-регулирующих прокладок на стыке недопустимо, так как при этом нарушается правильность посадки подшипников в гнезда. Разъем обычно ослабляет корпус.

Корпусные детали, позволяющие осуществлять осевую сборку, изготавливаются более просто. В многоступенчатых механизмах возможно расположение осей зубчатых колес в разных плоскостях. Но монтаж в системах осевой сборки обычно сложнее, особенно в тех случаях, когда диаметры колес больше, чем диаметр посадочного отверстия подшипника (рис. 6.4).

В ряде случаев мелкие на вид и труднообнаруживаемые ошибки установки деталей при сборке могут привести к ухудшению работы сборочной единицы и даже к авариям. Технологичными в этом смысле будут конструкции, исключаящие возможность установки

Рис. 6.4. Схема осевой сборки промежуточного вала двухступенчатого редуктора с продеванием вала через введенные в корпус сверху зубчатые колеса:

1, 2 — зубчатые колеса; 3 — корпус; 4 — вал

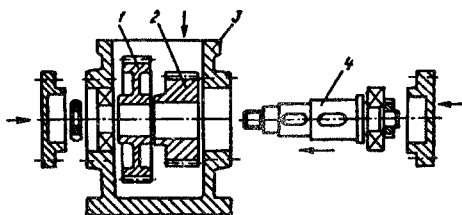
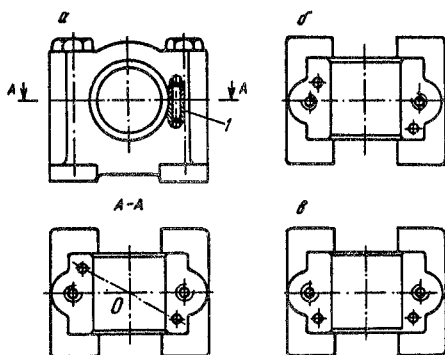


Рис. 6.5. Нетехнологичное (а) и технологичное (б, в) расположение штифтов в корпусе подшипника



детали в неправильном положении. Например, положение крышки корпуса подшипника (рис. 6.5) определяется двумя штифтами 1. Если они расположены симметрично относительно точки O (рис. 6.5, а), то позволяют устанавливать крышку повернутой на 180° по сравнению с положением, в котором проводилось растачивание основного отверстия (в сборе). В результате этого будет нарушена точность формы основного отверстия. Асимметричное расположение штифтов (рис. 6.5, б, в) является технологичным, так как не позволяет устанавливать крышку подшипника в неправильном положении.

6.2.2. Организационные формы сборки

Основными организационными формами сборки являются *стационарная* и *подвижная*. В первом случае изделие полностью собирают на одном месте (рабочем посту), к которому подаются все детали и сборочные единицы. При подвижной сборке собираемое изделие последовательно перемещается от одного рабочего места к другому. На каждом рабочем месте выполняется определенный набор операций. Для этого оно снабжено соответствующими инструментами и механизмами. Необходимые для сборки детали и сборочные единицы подаются к каждому рабочему месту.

Стационарная сборка может осуществляться без расчленения (*принцип концентрации*) и с расчленением (*принцип дифференциации*) сборочных работ. В первом случае сборку осуществляет один

рабочий высокой квалификации. Цикл сборки по этому принципу удлиняется, а при большой программе выпуска требуется много площади, инструмента и т. п. Стационарная сборка без расчленения сборочных работ применяется в опытном и мелкосерийном производстве, однако в настоящее время такая организация сборки начинает распространяться и в ряде производств средней серийности. Сборщик не только выполняет все операции от начала до конца, но и проводит испытание изделия (или сборочной единицы). Это значительно повышает его ответственность за результаты сборки, а следовательно, за качество и надежность изделия.

Разновидностью стационарной сборки без расчленения процесса является бригадный метод, когда сборку всего крупногабаритного изделия выполняет бригада рабочих. Но бригадный метод часто является первым шагом на пути дифференциации, ибо внутри бригады обычно имеет место некоторое разделение работ: одни рабочие специализируются на одной группе сборочных операций, другие, в соответствии со своей квалификацией, — на другой. Бригада должна иметь оптимальный состав, зависящий от сложности и габаритов изделия, а также объема его выпуска. При слишком большом количестве рабочих в бригаде они будут мешать друг другу.

Стационарная сборка с расчленением работ предполагает деление процесса на узловую и общую сборку изделия. При этом сборку узлов (сборочных единиц) и общую сборку изделия выполняют в одно и то же время (параллельно) рабочие одной бригады. В таком случае существенно сокращается время цикла сборки. Благодаря специализации повышается производительность труда.

При сборке сложных крупных машин возможна и выгодна большая дифференциация сборочных работ. При этом собираемые машины размещают на стендах или стапелях, а рабочий (или небольшая бригада) выполняет у каждого объекта свой набор сборочных операций, затем переходит к следующему объекту, где прорабатывает ту же работу, и т. д.

Подвижная сборка может осуществляться только при условии расчленения сборочных работ. Перемещение изделия (сборочной единицы) между сборочными постами может быть свободным или принудительным. В первом случае собираемые изделия перемещаются самими исполнителями с помощью подъемно-транспортных средств или тележек, а ритм перемещения обычно не регламентируется. Свободное перемещение изделий при сборке применяется в мелкосерийном производстве.

Принудительное перемещение объектов сборки осуществляется механическими транспортными устройствами (конвейерами) непрерывного или прерывного (периодического) действия и применяется обычно в крупносерийном и массовом производстве. Главной ха-

рактической характеристикой принудительного перемещения является одновременность движения всех объектов.

Поточной называется сборка, при которой работа идет непрерывно и собранные изделия выходят периодически через определенный промежуток времени (такт). Поточная сборка может применяться как при подвижном, так и при неподвижном объекте сборки. С этой точки зрения поточную сборку подразделяют на два вида: поточную подвижную и поточную стационарную.

Для осуществления поточной сборки необходимо: 1) расчлнить весь сборочный процесс на отдельные операции, по возможности одинаковые или кратные по времени их выполнения, что должно привести к синхронизации операций по такту и непрерывности собираемых с определенной часовой, сменной и другой производительностью (темпом) изделий; 2) обеспечить передачу собираемого объекта на каждую последующую операцию немедленно по окончании предыдущей; 3) выполнить регулярную и своевременную (до начала соответствующей операции) доставку к сборочным рабочим местам комплектов деталей и сборочных единиц; 4) обеспечить взаимозаменяемость деталей, при которой исключается пригонка по месту.

Сложность организации поточной сборки в крупносерийном и массовом производстве окупается теми преимуществами, которые она дает, а именно: рабочие специализируются на выполнении определенных операций; специализация рабочих и механизация рабочих мест существенно сокращают время выполнения операций; значительно повышается пропускная способность сборочного цеха; лучше используются рабочие по квалификации, так как они распределяются по операциям соответственно сложности последних.

Поточная подвижная сборка выполняется на транспортных устройствах различного вида: 1) на рольгангах; 2) на рельсовых и безрельсовых тележках, перемещаемых вручную; 3) на рельсовых тележках, соединенных между собой и образующих тележечный конвейер; 4) на ленточных, пластинчатых и подвесных круговых конвейерах; 5) на специальных сборочных конвейерах, приспособленных для сборки определенного изделия; 6) на рельсовых путях, по которым перемещается собираемая машина на своих или временно прикрепленных к ней колесах; 7) на подвесных однорельсовых путях; 8) на карусельных столах. Подача изделия, т. е. движение конвейера, может быть непрерывным или периодическим. В первом случае, т. е. при непрерывной подаче изделий, рабочие выполняют свои операции во время движения конвейера, пока изделие проходит зону рабочего места, а во втором, т. е. при периодической подаче изделий, операции выполняются в период остановки конвейера. Вид движения конвейера выбирается в зависимости от размера произ-

водственной программы, характера собираемого изделия, сложности сборочных операций и других технологических факторов. Обычно при такте выпуска, меньшем 0,3 ч, применяется непрерывное движение собираемого объекта.

Тактом сборки называют время между выходом со сборки двух смежных готовых изделий. Номинальный такт сборки определяется по формуле

$$\tau_{\text{ном}} = 60\Phi_{\text{дт}}/N_{\text{г}} \text{ (мин/шт.)},$$

где $\Phi_{\text{дт}}$ — годовой (действительный) фонд рабочего времени, ч;
 $N_{\text{г}}$ — годовая программа выпуска изделий, шт.

Действительный такт отличается от номинального, так как при его определении учитываются потери времени на перерывы в работе и обслуживание рабочего места:

$$\tau_{\text{дт}} = \tau_{\text{ном}}(1 - (\alpha_{\text{об}} + \alpha_{\text{пв}})/100), \quad (6.1)$$

где $\alpha_{\text{об}}$, $\alpha_{\text{пв}}$ — относительные потери времени соответственно на обслуживание рабочих мест и регламентированные перерывы в работе для отдыха и естественных надобностей, %.

Время от момента поступления деталей на сборку до выпуска собранного изделия называется *циклом сборки* ($\tau_{\text{ц}}$):

$$\tau_{\text{ц}} = \tau_{\text{дт}}(N_{\text{пос}} + K_{\text{ком}} - 1),$$

где $N_{\text{пос}}$ — количество постов на поточной линии; $K_{\text{ком}}$ — количество комплектов сборочных единиц, собираемых в запас вне главного потока для обеспечения бесперебойной работы на главном конвейере. Количество рабочих мест-постов $N_{\text{пос}}$ на линии сборки равно числу сборочных и контрольных операций, предусмотренных в технологическом процессе.

Распределение операций между отдельными рабочими местами является достаточно сложной задачей. Операции нормальной трудоемкости (время выполнения операции меньше или равно действительному такту) закрепляют за рабочим местом по одной. Операции большей трудоемкости могут быть разделены между двумя (иногда тремя и более) рабочими местами с параллельным их выполнением на каждом рабочем месте. Однако при этом возникает проблема полной загрузки рабочих-дублеров. Полная загрузка возможна только при кратности длительности дублируемой операции длительности нормальной. Если загрузка рабочих мест с параллельным выполнением одной и той же операции оказывается недостаточной, то целесообразно пересмотреть некоторые операции сборки и, может быть, изъять их из процесса, разделив предусмотренные в них работы по частям между соседними недогруженными рабочими местами.

При большой расчлененности сборочного процесса и малой общей трудоемкости сборки изделия (сборочной единицы) такт сборки получается таким малым, что работа сборщиков требует большого напряжения. Чтобы уменьшить связанную с этим утомляемость, лучше передавать изделия на рабочие места не по одному, а партиями, объем которых зависит от габаритов и массы изделия, а также удобства его размещения в таре. При этом на рабочем месте создается задел из нескольких объектов и время выполнения операции над каждым объектом не связано жестко с тактом сборки на конвейере.

При поточном методе узловую сборку целесообразно располагать перпендикулярно к линии общей сборки таким образом, чтобы конечная операция сборки сборочной единицы выполнялась вблизи места ее установки на линии общей сборки (рис. 6.6). Если изделие окрашивается в собранном виде, то вслед за линией сборки располагают окрасочную и сушильную камеры. Часто такие камеры встраивают в потоки узловой сборки.

Однако близкое расположение мест узловой и общей сборки не является обязательным условием рациональной организации сборочного процесса во всех случаях. Есть немало примеров, когда узловая сборка организована в одном цехе, а общая — в другом. В таких случаях сборочные единицы передаются на конвейер общей сборки с помощью транспортных конвейеров.

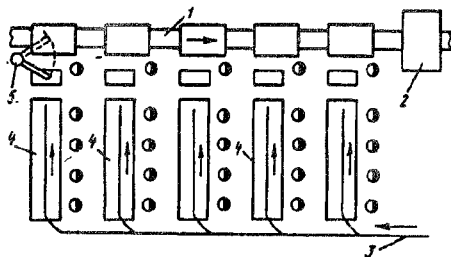


Рис. 6.6. Схема потоков узловой и общей сборки: 1 — поток общей сборки; 2 — камера окраски и сушки; 3 — грузопоток деталей; 4 — линии узловой сборки; 5 — кран-укосина

Высокий темп конвейерной сборки изделий требует четкой организации оперативного управления сборочным производством. Недостаточно высокий уровень планирования и учета поступления деталей и сборочных единиц из других цехов и склада, состояние заделов нередко вызывают нарушения ритма выпуска продукции.

Поточная сборка на неподвижных рабочих местах (стендах), или, иначе, *поточная стационарная (неподвижная) сборка*, применяется в мелкосерийном производстве, особенно для изделий большой массы, нетранспортабельных или требующих для перемещения сложных транспортных устройств. В таком случае весь процесс сборки расчленяется на примерно одинаковые по времени операции, каждая из которых выполняется определенной бригадой. А каждая бригада, переходя от одного стенда к другому, выполняет

на собираемых машинах только определенную, присвоенную ей операцию за установленный промежуток времени, соответствующий такту сборки. Инструменты и приспособления данной бригады находятся на подвижном столе, который перемещается вместе с бригадой от одного станда к другому.

Количество рабочих в бригаде определяется в соответствии с характером и сложностью выполняемой ею операции, а также тактом выпуска. Готовые собранные машины снимают со стандов поочередно через одинаковые промежутки времени. Необходимо отметить, что при стационарной поточной сборке нецелесообразно частое перемещение рабочих от одного станда к другому. Поэтому процесс сборки нужно расчленить на сравнительно трудоемкие операции, приблизительно кратные длительности рабочей смены. Тогда рабочие приступают к выполнению своей операции на следующем станде с начала смены или после обеденного перерыва. При такой организации основания (рамы, плиты и т. д.) очередных машин подаются на станды в нерабочее время (после окончания смены или в обеденный перерыв), что позволяет сократить требуемое количество стандов.

6.2.3. Методика проектирования технологических процессов сборки

Процесс проектирования технологии сборки можно разделить на следующие этапы: подготовительный, синтетический, аналитический и заключительный. На подготовительном этапе осуществляется анализ исходных данных и определение типа производства. Результатом анализа исходных данных являются:

- 1) расчленение изделия на сборочные единицы различных уровней и определение в каждой из них базовой детали согласно требованиям, указанным в п. 6.2.1;
- 2) оценка собираемости машины и ее сборочных единиц, т. е. легкости и доступности осуществления соединений;
- 3) определение заложенных в конструкцию машины методов компенсации погрешностей изготовления деталей;
- 4) выбор способов установки и настройки (регулировки) элементов конструкции, позволяющих компенсировать не только погрешности изготовления, но и погрешности сборки;
- 5) выявление основных точностных параметров машины и ее сборочных единиц, которые контролируются в сборе (эти параметры больше всего влияют на выполнение служебного назначения);

- 6) выявление наилучших, в точностном смысле, возможных положений подвижных элементов машины и ее механизмов;
- 7) изучение размерных цепей (должны представляться организацией-разработчиком), определяющих основные точностные параметры машины, для оценки степени влияния первичных погрешностей (изготовления и сборки) на выходные;
- 8) выявление возможных вариантов схем контроля, обеспечивающих независимость оценки определяемых параметров.

Для выявления типа производства необходимо по формуле (6.1) определить действительный такт $\tau_{дт}$ выпуска машины. При этом годовой фонд рабочего времени в случае двухсменной работы принимается равным 4080 ч, а $\alpha_{об} + \alpha_{пв} = 5...7\%$. Затем по аналогии с изделием, выпускавшимся ранее, или с помощью машиностроительных нормативов определяется штучное время ($\tau_{шт}$) на выполнение нескольких типовых операций сборки. Тогда

$$\tau_{шт} = (\sum \tau_{штi}) / n; \quad K_{сер} = \tau_{дт} / \tau_{шт}, \quad (6.2)$$

где n — число отобранных операций; $K_{сер}$ — коэффициент серийности. Для массового производства $K_{сер} < 2$, для крупносерийного $K_{сер} = 2...10$, для среднесерийного $K_{сер} = 10...20$, для мелкосерийного $K_{сер} > 20$. Вычисление $K_{сер}$ необходимо выполнять как для операций общей сборки, так и для операций узловой сборки. Следует учитывать, что для различных сборочных единиц могут иметь место различные типы производства.

На синтетическом этапе выполняются следующие проектные процедуры: разработка технологической схемы сборки, выбор организационной формы сборки, синтез маршрута сборки, выбор схем базирования, выбор видов технологического оборудования и оснастки, синтез операций сборки.

Технологической схемой сборки называют графическое изображение порядка комплектования изделия и (или) сборочных единиц. На технологической схеме каждый элемент изделия (сборочной единицы) обозначен прямоугольником, в котором указывается наименование элемента, его номер (или код) и количество элементов, входящих в изделие (или сборочную единицу). Рекомендуется разработать сначала технологическую схему общей сборки, а затем выделенных сборочных единиц (т. е. узловой).

Порядок комплектования лучше всего определять условной (по чертежам) или реальной (если есть готовое изделие) разборкой. Элементы изделия, которые можно снять в неразобранном виде, будут в дальнейшем использоваться для разработки технологических схем узловой сборки. При этом детали, снимаемые отдельно, яв-

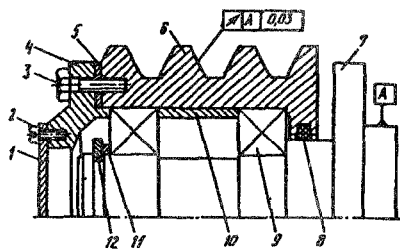


Рис. 6.7. Эскиз ступицы в сборе: 1 — крышка; 2,3 — винты; 4 — фланец; 5 — прокладка; 6 — шкив; 7 — ступица; 8 — кольцо уплотнительное; 9 — подшипник; 10 — втулка; 11 — кольцо компенсационное; 12 — кольцо стопорное

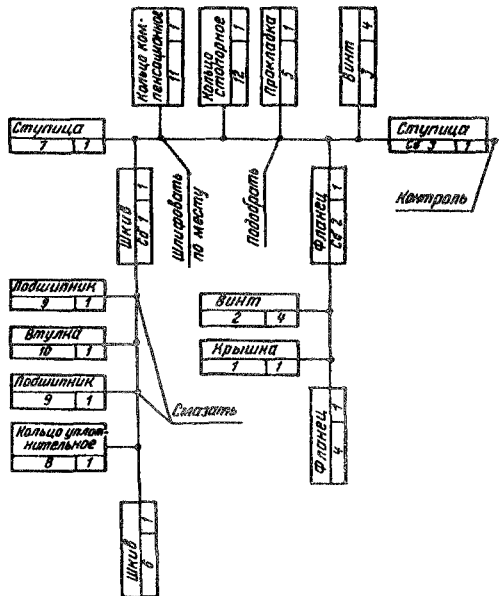


Рис. 6.8. Технологическая схема сборки ступицы

более высокого порядка (фланец Сб 2). Если далее снять стопорное кольцо 12, то можно, не разбирая, снять с базовой детали 7 шкив 6 с подшипниками 9, распорной втулкой 10 и уплотнительным кольцом 8. Указанная совокупность деталей образует вторую сборочную единицу (шкив Сб 1) более высокого порядка, чем ступица. Данные сборочные единицы состоят уже из деталей. Детали 3, 5, 11 и 12 не входят в сборочные единицы Сб 1 и Сб 2 и будут использоваться при общей сборке.

Каждая ветвь технологической схемы сборки начинается базовой деталью (фланец 4, шкив 6 и ступица 7) и заканчивается сборочной единицей. В общем случае возможна разработка нескольких вариантов технологической схемы сборки.

Организационная форма сборки выбирается с учетом типа про-

ляются элементами, которые непосредственно входят в технологическую схему общей сборки.

Рекомендуется в нужных местах технологической схемы указывать некоторые виды работ (заливка масла, контроль, регулировка, обкатка и т. д.). Технологическая схема сборки сборочной единицы, показанной на рис. 6.7, приведена на рис. 6.8. Если вывинтить винты 3, то можно снять фланец 4 с крышкой 1, прикрепленной к нему винтами 2. Таким образом получаем первую сборочную единицу более

изводства, массы и конструкции изделия (см. п. 6.2.2). Она чаще всего может быть различной для общей и узловой сборки.

Элементами, из которых осуществляется синтез маршрута сборки, являются сборочные переходы, описанные и частично классифицированные в гл. 3. Из всей номенклатуры переходов сборки сумма нетиповых и специфичных составляет до 20% для изделий серийного производства и только до 6% — для массового. Все типовые переходы сборки можно разбить на шесть классов (в седьмой входят нетиповые переходы): 1) подготовительные работы; 2) транспортные работы; 3) досборочные работы; 4) сборочные работы; 5) окрасочные работы; 6) электромонтажные работы. Часто для каждого класса работ организуется самостоятельный производственный участок.

Каждый класс сборочных переходов делится на подклассы, группы и в некоторых случаях — на подгруппы работ. Нижний уровень классификации составляют типовые сборочные переходы. Так, подготовительные работы делятся на два подкласса — очистку и комплектование. Очистка осуществляется промывкой и обдувкой. В отдельную группу работ выделяется промывка каналов.

Класс транспортных работ делится на следующие подклассы: перемещение, установка. Установка базовой детали может быть свободной (частичная ориентация) и с базированием (в приспособлении). В последней группе выделяют установку, позволяющую выполнять переориентацию базовой детали для дальнейшей сборки без открепления.

Класс досборочных работ делится на следующие подклассы: балансировка, размерная обработка, совместная обработка. Балансировка может быть статической и динамической. В зависимости от вида обрабатываемой поверхности в подклассе «размерная обработка» выделяют рихтовку, обработку отверстий, обработку сопряжений. Обработка отверстий осуществляется сверлением, развертыванием, зенкерованием, дорнованием и нарезанием резьбы метчиками. Она может выполняться на станках или с помощью механизированных приспособлений. В эту же подгруппу включена разметка. Обработка сопряжений (направляющие, пазы и т. д.) осуществляется опиливанием, шабрением, притиркой, вибронакатыванием и вибровыглаживанием. Совместная обработка производится после регулировки (обычно сверлением и развертыванием).

Класс сборочных работ делится на следующие подклассы: свободное сочленение (для подвижных соединений), закрепление (резьбовое), запрессовка, пластическое деформирование, пайка, склеивание, регулировка, подбор деталей в комплекты, смазывание, контрольно-проверочные работы. Последние могут входить составной частью в подкласс «регулировка».

Подкласс «резьбовое закрепление» состоит из следующих групп

переходов: ввертывание шпильки, навинчивание (ввинчивание), затягивание, стопорение. Запрессовка может осуществляться: осевой силой при нормальной температуре, с нагревом охватывающей детали, с охлаждением охватываемой детали. Соединение пластическим деформированием можно осуществить развальцовкой и высадкой (при сборке заклепочных соединений).

Если невозможно достигнуть заданной точности замыкающего звена методами полной, неполной или групповой взаимозаменяемости, то выполняются работы подклассов «регулировка» и «подбор деталей в комплекты». В зависимости от объекта регулировки различают: регулировку расстояний, регулировку относительных поворотов (параллельности, перпендикулярности), регулировку совмещения (соосности, пересечения и т. д.). Подбор деталей осуществляется не только по размерам, но и по массе, по интенсивности шума зубчатых зацеплений и т. д.

Смазочный материал можно наносить на детали в процессе сборки кистью или масленкой, а также заправлять в сборочную единицу шприцем или шпателем. Войлочные уплотнительные кольца или пористые вкладыши подшипников могут перед сборкой пропитываться смазочным материалом.

Проверка сборочных единиц и изделий производится наружным осмотром и измерением параметров (зазоров, биений, размеров, относительных поворотов и движений). При оценке качества движения проверяют отклонения от заданного закона движения, плавность движения и нагрузки холостого хода.

В класс окрасочных работ включены: подготовка поверхности, грунтование, шпаклевание, шлифование по слою шпаклевки, окраска, сушка, консервация, упаковка.

Электромонтажные работы имеют свою специфику и в данном курсе не рассматриваются.

Выбор необходимых переходов сборки из указанного выше набора осуществляется на основании анализа сборочных чертежей, а последовательность их выполнения устанавливается согласно разработанной технологической схеме и следующих дополнительных соображений. Если изделие (или сборочная единица) имеет несколько размерных цепей, то сборку предпочтительно начинать с наиболее сложной и ответственной цепи. В каждой размерной цепи сборку следует завершать установкой тех элементов соединения, которые формируют ее замыкающее звено. При наличии размерных цепей с общими звеньями начинать сборку следует с элементов той цепи, которая больше всего влияет на точность изделия. Если цепи равноценны по точности получаемых результатов, сборку следует начинать с более сложной цепи.

На последовательность выполнения переходов сборки влияют функциональная взаимосвязь элементов изделия (сборочной единицы), конструкция базовых элементов, условия монтажа силовых и кинематических передач, желательность установки легко повреждаемых элементов в конце сборки, размеры и масса присоединяемых элементов, а также степень взаимозаменяемости. При сборке взаимно незаменимых изделий на последовательность выполнения переходов влияют пригоночные работы, промежуточная сборка и разборка соединений, совместная обработка и необходимость промежуточного контроля.

Схемы базирования изделий при узловой и общей сборке выбирают для обеспечения заданной точности сборки, удобства ее выполнения сборщиками, упрощения конструкции приспособлений, оборудования и транспортных средств, а также надежной собираемости деталей. Последнее важно в условиях механизированной и автоматизированной сборки. В зависимости от точности ориентации базовой детали и постоянства ее технологических баз различают следующие основные случаи базирования.

1. Неточное (неполное) базирование базовой детали, которое позволяет с одной установки выполнять все переходы сборки изделия (сборочной единицы). Случай характерен для ручной сборки, когда достаточно обеспечить неподвижность базовой детали, удобство подвода присоединяемых деталей и сборочных приспособлений и инструментов с разных (необходимых) сторон.

2. Неточное базирование базовой детали с необходимостью последовательной смены ее технологических баз. И этот вариант базирования применяется при ручной сборке в случаях, когда конструкция изделия (сборочной единицы) не позволяет выполнять всю сборку с одной установки.

3. Точное базирование базовой детали на единый для всего процесса сборки комплект баз (обязательно обработанных поверхностей). Данный вариант характерен для механизированной и автоматизированной сборки, а также для ручной сборки в приспособлениях для точной относительной ориентации сопрягаемых деталей.

4. То же, что и п. 3, но с последовательной сменой технологических баз.

Для осуществления соединений необходимо также базирование комплектующих (присоединяемых) и соединительных деталей, обеспечивающее условие собираемости, т. е. максимально допустимые значения отклонений относительного положения сопрягаемых поверхностей собираемых деталей. На условие собираемости деталей влияют не только допустимое смещение и перекос осей сопрягаемых поверхностей, но и поведение собираемых деталей в процессе со-

пряжения, например необходимость смещения и поворота одной из сопрягаемых деталей в пределах погрешности их относительного расположения. В сборочных устройствах подобные смещения (компенсация) происходят за счет податливости исполнительного элемента устройства или зазоров.

На условия собираемости двух деталей, сопрягаемых по цилиндрическим, резьбовым, плоским и другим поверхностям, оказывают влияние фаски на их заходных участках, выполняющие роль подвижных компенсаторов. Силы тяжести или силы, прилагаемые при сборке, вызывают на фасках заходных участков реакции, которые обеспечивают компенсирующие смещения одной из сопрягаемых деталей.

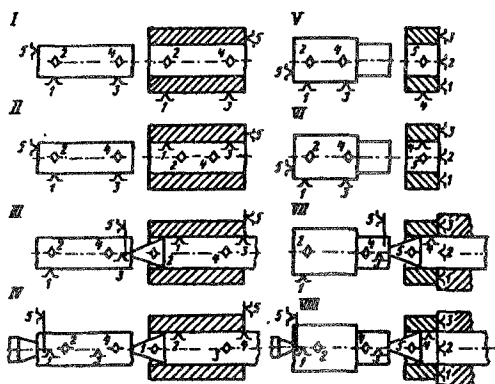


Рис. 6.9. Варианты схем базирования при сопряжении по цилиндрическим поверхностям

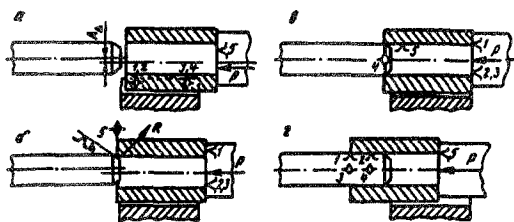


Рис. 6.10. Схема процесса смены баз при сопряжении по цилиндрическим поверхностям

на точность положения по-разному.

Так, при схеме базирования I (см. рис. 6.9) на соосность сопрягаемых поверхностей влияют допуски на диаметры вала и отверстия втулки, а также на смещение осей отверстия и наружной поверхности втулки. Процесс сопряжения осуществляется в три стадии (рис. 6.10). На первой стадии (рис. 6.10,а) происходит скольжение

Наиболее характерные схемы базирования деталей, сопрягаемых по цилиндрическим поверхностям, показаны на рис. 6.9. Основными факторами, влияющими на точность совпадения осей сопрягаемых поверхностей для приведенных схем базирования, являются погрешности диаметральных размеров, геометрической формы сопрягаемых поверхностей и баз (изогнутость, овальность, конусность и т. д.), относительного расположения сопрягаемых поверхностей и баз (неперпендикулярность, несоосность и т. д.). В каждой схеме базирования каждый из перечисленных факторов влияет

по образующей втулки-питателя или плоскостям призмы до момента соприкосновения с фаской сопрягаемого вала. Если при этом ось втулки находится ниже оси вала, то в этот момент не произойдет заклинивания, а сила P , приложенная к торцу втулки, вызовет на фаске реакцию R , которая заставит втулку скользить по фаске, одновременно отрываясь от призмы. При этом происходит смена баз: базирующие точки 1...3 перейдут на торец втулки, а точка 4 — в место контакта кромки втулки с фаской вала (рис. 6.10,б). Вторая стадия продолжается до тех пор, пока не совпадут контуры валика и отверстия втулки (рис. 6.10,в). Совмещение контуров определяет начало третьей стадии, т. е. непосредственного сопряжения (рис. 6.10,г).

При схеме базирования II (рис. 6.9) на соосность сопрягаемых поверхностей уже не влияет смещение осей отверстия и наружной поверхности втулки, а при схемах базирования V и VI смещение осей ступеней вала приводит к несоосности сопрягаемых поверхностей. При базировании вала по центровым отверстиям (схемы III, IV, VII и VIII) биение его сопрягаемой поверхности относительно оси центровых отверстий также приводит к погрешности схемы базирования.

При сборке с сопряжением по цилиндрическим поверхностям с обеспечением точности положения собираемых деталей вдоль оси сопрягаемых поверхностей возможны два случая: 1) вал (или втулка) устанавливается до упора в его торец; 2) вал (или втулка) устанавливается вдоль оси с точностью, которая обеспечивается сборочным приспособлением (рис. 6.11). Первый вариант (рис. 6.11,а) является неудачным, так как при такой схеме базирования точность выдерживаемого размера A_{Δ} будет зависеть от погрешностей размеров корпуса 1 (A_1, A_2) и втулки 2 (A_3), т. е. погрешность схемы базирования $\Delta_6(A_{\Delta})$ в данном случае будет определяться выражением

$$\Delta_6(A_{\Delta}) = TA_1 + TA_2 + TA_3,$$

где TA_i — допуск на соответствующий (A_i) размер. Кроме того, будет иметь место систематическая погрешность, обусловленная точностью изготовления детали 3 приспособления по настроечному размеру A_H .

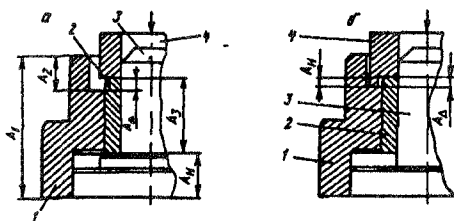
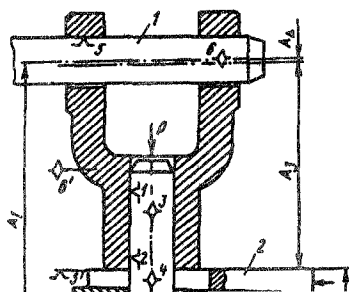


Рис 6.11 Варианты схем базирования в приспособлениях для сборки втулки с корпусом при необходимости выдерживания размера A

При втором варианте (рис. 6.11,б) погрешность схемы базирования по A_{Δ} равна нулю. Имеет место только систематическая погрешность, обусловленная точностью изготовления пуансона 4 по размеру $A_{\text{н}}$.

Не всегда имеется возможность непосредственного использования схемы базирования, при которой необходимые сборочные базы совпадают с сопрягаемыми поверхностями (или измерительными базами), как это имело место в случае, показанном на рис. 6.11,б. Тогда можно применить принцип смены баз в процессе базирования и подвижных компенсаторов. Пример такого решения задачи показан на рис. 6.12. Для запрессовки подшипников и упорных пружинных колец в отверстие проушины вилки карданного шарнира необходимо обеспечить его точное положение по высоте (несмотря на колебания размера A_3) и углу поворота относительно вертикальной оси.

На первом этапе базирования осуществляется приблизительное ориентирование с помощью опорных точек на торце (5') и проушине (6'). Это приближенное базирование дает возможность вилке кардана перемещаться в пределах, необходимых для ввода оправки 1 в отверстия проушины. При этом происходит смена баз, которые переходят в указанные отверстия про-



где Δ_i — допуск на i -й размер размерной цепи схемы базирования; Δ_E — допустимое по условию собираемости смещение; α_j — допуск на j -й относительный поворот размерной цепи схемы базирования; α_E — допустимый по условию собираемости относительный поворот.

Условие собираемости рассматривается для начального этапа процесса сопряжения (см. рис. 6.10, б). Значения Δ_E и α_E определяются теоретически (для относительно простых случаев) или экспериментально. Согласно рис. 6.13, а, допустимое смещение осей при $D > d$

$$\Delta_E = C_A + C_B + (D-d)/2,$$

где C_A, C_B — размеры фасок соответственно отверстия и вала.

Из треугольников ekt и ent (рис. 6.13, б) при $D > d$ после упрощения получаем

$$\alpha_E = \arctg((D-d)/(L-C_A)),$$

где L — требуемая глубина свободного ввода.

Для деталей, сопрягаемых по цилиндрическим поверхностям с гарантированным натягом ($D < d$), значение α_E ограничивают размерами фаски, чтобы при приложении силы их не заклинило. Тогда (рис. 6.13, в)

$$\alpha_E = \arcsin(C_B/D)$$

или

$$\alpha_E = \arcsin(C_A/D).$$

Согласно рис. 6.14, а, параметр собираемости Δ_E можно определить выражением

$$\Delta_E = b/3,$$

где b — ширина шпонки, радиус скругления которой, равный $b/2$, работает при сопряжении как фаска. Тогда допустимая погрешность угла поворота вала φ_E в начале сопряжения определяется выражением

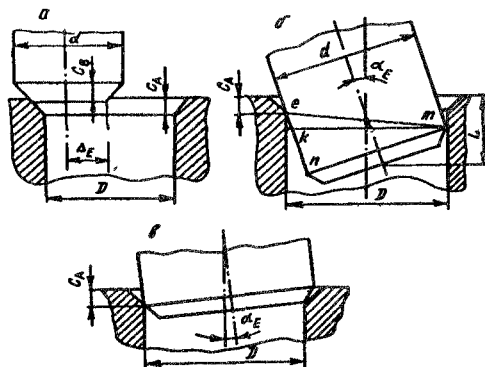


Рис. 6.13. Схемы оценки условий собираемости по цилиндрическим поверхностям

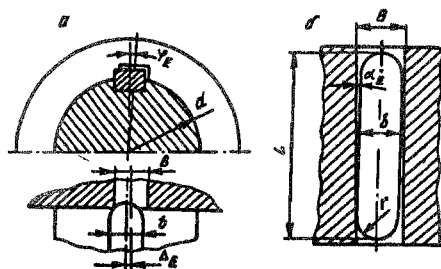


Рис. 6.14. Схемы оценки условий собираемости шпоночного соединения

$$\varphi_E = \arcsin(2\Delta_E/d).$$

Согласно рис. 6.14,б, допустимый угол перекоса шпонки (или паза) α_E можно определить следующим образом:

$$\alpha_E = \arcsin((B-b)/(L-b)).$$

Если найденные значения параметров условия собираемости станут слишком жесткие требования по точности, то придется повторно пересматривать технические требования к объекту сборки и составляющим его деталям.

3. Выбирается схема базирования (по возможности следует использовать в качестве технологических при сборке баз поверхности, по которым должно осуществляться сопряжение); намечается принципиальная конструктивная схема установочных и направляющих элементов сборочного приспособления; выявляются размерные цепи системы «сборочное устройство — собираемые детали»; назначаются допуски на составляющие звенья размерных цепей исходя из значений параметров условия собираемости и принятого метода достижения заданной точности (полная, частичная или групповая взаимозаменяемость).

Затем следует приступить к выбору характеристик оборудования и оснастки для сборки, которые условно могут быть разделены на две группы: 1) технологические, предназначенные непосредственно для осуществления подвижных или неподвижных сопряжений деталей, их регулировки и контроля в процессе узловой и общей сборки; 2) вспомогательные, назначение которых — механизировать все виды вспомогательных работ (в основном подъемно-транспортных).

Характеристики сборочного оборудования зависят от типа производства (табл. 6.1). Существует определенная зависимость между типом производства и общей временной структурой слесарно-сборочных работ (табл. 6.2), которую нужно учитывать при принятии решений по выбору оборудования и транспортных средств.

Механизация технологических операций преследует такие цели: 1) сокращение трудоемкости за счет уменьшения элементов основного времени; 2) повышение качества выполнения операции (по точности и надежности); 3) сокращение длительности естественных процессов с соответствующим уменьшением незавершенного производства (в качестве примера можно привести использование рефлекторных или индукционных устройств для сушки); 4) синхронизация операций за счет сокращения длительности наиболее трудоемких.

Табл. 6.1. Сборочное оборудование и оснастка

Характеристика	Тип производства		
	единичное и мелкосерийное	серийное	крупносерийное и массовое
Гибкость оборудования	Универсальное	Универсальное и специализированное	Специализированное и специальное
Уровень механизации и автоматизации	Частичная механизация	Частичная и широкая механизация	Комплексная механизация, частичная автоматизация
Оснащение для основных операций	Механизированный и немеханизированный инструмент, специализированные стенды, универсально-сборные приспособления	Механизированный инструмент, прессы, манипуляторы, универсально-налаживаемая оснастка, специализированные стенды, приборы контроля	Полуавтоматы и автоматы, сборочные роботы, механизированный инструмент со стационарным креплением, специальный инструмент и приспособления
Транспортные средства	Подъемные краны, тельферы и тележки	Краны, тельферы, рольганги и тележки	Конвейеры, скакаты, склизы и т. д.

Табл. 6.2. Временная структура слесарно-сборочных работ (в % к общей трудоемкости сборки)

Виды сборочных работ	Тип производства				
	единичное	серийное			массовое
		мелко-	средне-	крупно-	
Пригоночные	25...30	20...25	15...20	10...15	—
Сборка узловая	5...10	10...15	20...30	30...40	45...60
Сборка общая	60...70	60...70	50...65	45...60	40...55

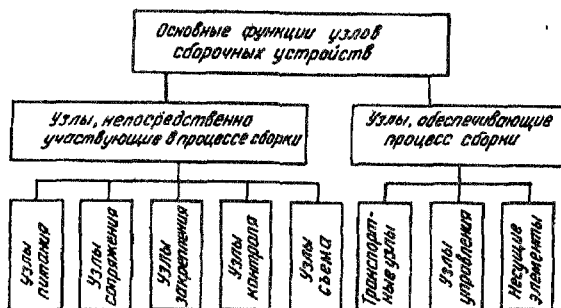
Механизированные приспособления состоят из рабочих органов (отверток, пуансонов и т. д.), приводов (чаще всего от электродвигателей), передаточных механизмов. Характерными для этих приспособлений являются ограничители передаваемого момента или мощности, устройства для изменения режима работы и для установки базовой детали. Наиболее яркие представители этой группы — электромеханические гайковерты (или отвертки). Дальнейшее развитие механизированных приспособлений состоит в оснащении их магазинными устройствами для автоматической подачи деталей.

Полуавтоматические установки (например, для сборки резьбовых соединений) оснащены загрузочными устройствами с механизмами ориентации (вибрационные бункеры разных видов, реже — секторные или шиберные механизмы). Базовые детали можно подавать и удалять в виде собранного узла вручную.

Ниже приведен укрупненный классификатор сборочного оборудования, охватывающий основные группы применяемых в настоящее время сборочных устройств и показатели их прогрессивности.

<i>Средства механизации и автоматизации</i>	<i>Показатель прогрессивности</i>
1. Механизированные сборочные приспособления и инструмент (пневмоэлектровертки, пневмоскобы и т. д.)	0,15
2. Механизированные сборочные приспособления и инструмент с автоматической подачей соединительных элементов (винтов, заклепок, припоя, клея и т. д.), а также с автоматической регулировкой параметров процесса	0,35
3. Прессы, станки для свинчивания, развальцовывания, клепки, пайки, сварки, мерной резки неавтоматизированные	0,25
4. Сборочное оборудование однопозиционное с автоматизацией отдельных параметров процесса	0,6
5. Сборочное оборудование многопозиционное без средств межоперационного транспортирования	0,6
6. Автоматизированное сборочное оборудование с автоматической подачей одной из соединяемых деталей	0,7
7. Автоматизированное сборочное оборудование с автоматической подачей двух-трех деталей	0,8
8. Автоматизированное сборочное оборудование с автоматической подачей четырех и более деталей	0,9
9. Сборочные однопозиционные автоматы	1
10. Сборочные многопозиционные автоматы, автоматические линии, в том числе с совмещением обработки и сборки	1
11. Рабочее место на конвейере с принудительным ритмом и автоматическим адресованием изделий	0,25
12. Рабочее место на поточно-механизированной линии	0,15

Рис. 6.15. Классификационная схема функций узлов сборочных машин (устройств)



Важной характеристикой сборочного оборудования является его гибкость. Она может быть достигнута за счет применения метода регулирования отдельных параметров машины. Но переналадка регулировкой обеспечивает возможность использования устройства в пределах технологического ряда изделий.

Более широкие возможности предоставляет *метод агрегатирования*, когда новые устройства создаются за счет перекомпоновок из стандартизированного ряда унифицированных агрегатов (узлов). Классификация функций узлов сборочных машин показана на рис. 6.15. Узлы питания осуществляют подачу, относительную ориентацию, поштучную передачу деталей в зону сборки. Узлы сопряжения выполняют соединение деталей по сопрягаемым поверхностям, узлы закрепления — силовое замыкание соединяемых деталей, узлы контроля — контроль наличия и положения деталей, а также качества выполнения процесса сборки, узлы съема — сбрасывание или съем собранного узла с сохранением ориентации. Транспортные узлы обеспечивают межоперационное транспортирование деталей и сборочных единиц, а узлы управления — заданную последовательность выполнения переходов и режимов работы. Несущие элементы предназначены для обеспечения заданного относительного расположения узлов и механизмов сборочного устройства.

Научно-исследовательским технологическим институтом приборостроения совместно с рядом других организаций разработан вариант системы агрегатирования, который включает номенклатуру типовых агрегатных узлов сборочных машин применительно к условиям приборостроительной промышленности. Номенклатура разработана на базе статистического анализа конструкций приборов в соответствии с конструктивно-технологической классификацией сборочных операций. Типовые агрегатные узлы сборочных машин изготавливаются централизованно, в результате чего заводы сами могут компоновать необходимое оборудование в соответствии с технологическими процессами сборки.

К началу выполнения процедуры *синтеза операций сборки* из-

вестны: тип производства и организационная форма сборки; перечень необходимых переходов и последовательность их выполнения; схемы базирования и закрепления; характер (типаж) технологического и транспортного оборудования, необходимых приспособлений и инструментов. При синтезе операций осуществляется объединение переходов в установовы и последних в операции, устанавливается последовательность и возможность совмещения переходов во времени, окончательно выбираются характеристики технологического и транспортного оборудования, приспособлений и инструментов (или выдается задание на проектирование специальной оснастки). Кроме того, составляются схемы контроля и разрабатываются при необходимости подробные контрольные операции.

При синтезе операций в зависимости от типа производства и организационной формы сборки могут быть использованы принципы концентрации и дифференциации операций. В некоторых случаях в одном и том же технологическом процессе сборки могут быть применены оба принципа (первый для одних операций, а второй для других). В концентрированной операции сочетается (последовательно, параллельно и(или) последовательно-параллельно) несколько переходов. Наиболее часто такие операции синтезируются для мелкосерийного и серийного производства при использовании ручного труда. В определенных условиях целесообразно осуществлять концентрированную сборочную операцию на автоматизированном сборочном оборудовании (т. е. для массового производства).

В некоторых случаях прогресс технологии сборки бывает связан с дифференциацией сборочных процессов, когда в операцию входит только один переход. При поточной сборке необходимо согласовывать длительность операций с тактом выпуска, т. е. сумма оперативных времен на выполнение всех переходов каждой операции должна по возможности приближаться (оставаясь меньше) к действительному такту сборки.

На аналитическом этапе определяются нормы времени, экономические характеристики вариантов технологических процессов сборки, межоперационные заделы.

• Нормирование сборочных работ является заключительным этапом разработки технологического процесса сборки, но потребность в нем возникает на предыдущих этапах — сначала при определении типа производства, затем при синтезе операций. Структура штучного времени на сборочную операцию такая же, как и на операцию механической обработки (см. § 1.4). Основное время тратится на изменение состояния объекта производства в процессе сборки (на выполнение соединений, регулировку, пригонку, размерную сортировку, подготовку к сборке). Вспомогательное время затрачивается

на установку базовой детали (сборочной единицы), снятие собранной сборочной единицы и контроль качества сборки.

Нормативы времени на слесарно-сборочные работы содержат нормы основного и вспомогательного времени выполнения наиболее распространенных сборочных переходов.

В зависимости от типа производства и имеющейся нормативной базы используется один из трех известных методов нормирования слесарно-сборочных работ: 1) расчетно-аналитический; 2) хронометражный; 3) укрупненный. Первый метод, основанный на нормативах затрат времени на типовые переходы и приемы, пригоден в условиях крупносерийного и массового производства и требует подробной разработки содержания операций. Чаще всего он используется при автоматизированной сборке. База нормативов создается экспериментально. На многих предприятиях на сборочные работы имеются формулы (линейного типа) для определения трудоемкости типовых сборочных работ.

Хронометраж используется не только при создании базы нормативов для расчетно-аналитического нормирования, но и непосредственно для нормирования в действующем производстве, при уточнении норм или при совершенствовании технологии.

Для определения трудоемкости сборочных работ по укрупненным показателям пользуются среднестатистическими данными о трудоемкости сборочных работ на одну тонну массы изделия или (при производстве энергетических машин) на единицу мощности изделия и о процентном отношении трудоемкости сборки к трудоемкости механической обработки для изделий-аналогов. Общую трудоемкость сборки $\tau_{сб}$ можно подразделить на трудоемкость слесарно-пригоночных работ $\tau_{слес}$, узловой сборки $\tau_{сб.у}$ и общей сборки $\tau_{сб.о}$ (см. табл. 6.2). Данные табл. 6.2 можно использовать для укрупненных расчетов.

Для оценки качества разработанного технологического процесса сборки необходимо все его операции объединить в следующие группы: $O_{сб}$ — собственно сборочные операции, заключающиеся только в сочленении деталей (свинчивание, запрессовка, постановка на место и т. п.) и не требующие никаких пригонок или регулировки; $O_{рег}$ — операции нормальной регулировки сопряжений, производимой перемещением или поворотом деталей с последующим их закреплением, но без пригонки и без повторной разборки и сборки; $O_{шт}$ — то же, но с последующей штифтовкой без разборки; $O_{шт.р}$ — штифтовка деталей, требующая последующей разборки, промывки и повторной сборки; $O_{приг}$ — пригоночные операции; $O_{п.сб}$ — операции по разборке и повторной сборке, вызванные конструкцией изделия (невозможность поставки на место пред-

варительно собранной и отлаженной сборочной (функциональной) единицы без частичного снятия некоторых деталей).

Операции $O_{сб}$, $O_{рег}$ и $O_{шт}$ являются операциями нормального сборочного процесса, и, следовательно, их удельный вес в общей трудоемкости сборки $\tau_{сб.0}$ будет характеризовать качество процесса сборки и определять значение коэффициента $K_{к.сб}$ качества сборки:

$$K_{к.сб} = (\tau_{сб} + \tau_{шт} + \tau_{рег}) / \tau_{сб.0},$$

где $\tau_{сб}$, $\tau_{шт}$, $\tau_{рег}$ — трудоемкости указанных групп операций. Очевидно, что чем выше коэффициент качества $K_{к.сб}$, тем на более высоком уровне будет находиться анализируемый процесс сборки.

Важным показателем, характеризующим качество сборочного процесса, является коэффициент уровня механизации (автоматизации) $K_{у.м}$:

$$K_{у.м} = (\tau_{мех} + \tau_{м.р}) / \tau_{сб.0},$$

где $\tau_{мех}$ — время механизированного труда в процессе сборки; $\tau_{м.р}$ — время механизированного труда при применении ручных машин.

Достаточно важным показателем качества технологического процесса сборки является коэффициент точности сборки $K_{пот}$:

$$K_{пот} = \tau_{пот} / \tau_{сб.0},$$

где $\tau_{пот}$ — трудоемкость сборочных работ, выполняемых на поточных линиях или (в случае стационарной поточной сборки) перемещающимися бригадами.

Показатели уровня качества технологического процесса сборки для разных типов производства приведены в табл. 6.3. Кроме рассмотренных выше коэффициентов качества, в данной таблице приведены значения коэффициента типизации технологических процессов $K_{т.т}$.

На заключительном этапе результаты проектирования оформляются в технологических картах, форма которых определена Единой системой технологической документации (ЕСТД). *Карты технологического процесса* (КТП) сборки составляют на каждую отдельно собираемую сборочную единицу, а также на общую сборку изделия. *Комплектовочную карту сборки* (КК) оформляют в зависимости от условий и характера производства.

Ведомость оснастки (ВО) включает наименования и обозначения всех видов оборудования, приспособлений и инструмента, требуемых для выполнения технологического процесса сборки.

Табл. 6.3. Оценка качества технологического процесса сборки, %

Нормативный показатель качества	Уровень качества	Тип производства		
		единичное и мелкосерийное	серийное	крупносерийное и массовое
Коэффициент качества процесса сборки	Оптимальный	65	74	100
	Средний	60	70	90
	Низкий	54	66	73
Коэффициент уровня механизации	Оптимальный	40...50	60...65	75...90
	Средний	30...40	40...45	60...70
	Низкий	15...20	30	50
Коэффициент поточности сборки	Оптимальный	20...46	20	100
	Средний	10...20	50	90
	Низкий	до 10	30	70
Коэффициент типизации процессов сборки	Оптимальный	50...60	85...95	100
	Средний	40	70...75	80
	Низкий	20	50	60

В крупносерийном и массовом производстве сборщику на рабочем месте не требуются детальные и сборочные чертежи изделия, если он выполняет какой-либо комплекс работ (одну или несколько операций); ему необходима четкая, с исчерпывающими данными КТП и прилагаемые к ней карта эскизов (КЭ) и КК. Эти документы должны быть исчерпывающей инструкцией для осуществления сборки на данном рабочем месте.

Мастер, руководящий сборкой на участке (в отделении, пролете), должен иметь альбом технологических карт по всем сборочным единицам, сборкой которых он ведает. Кроме того, у него должен быть альбом узловых чертежей и рабочих чертежей основных деталей.

При единичном выпуске изделий составляется только перечень комплексов сборочных работ в требуемой последовательности, называемой *маршрутной технологией*. Пользуясь такой маршрутной технологией и чертежами, сборку могут производить только сравнительно квалифицированные рабочие-сборщики, так как порядок осуществления того или иного этапа сборки выбирают они сами и они же определяют наиболее рациональные приемы сборочных работ. В тяжелом машиностроении при единичном производстве основным оперативным документом сборки является технологическая схема (см. рис. 6.8), разрабатываемая для общей сборки машины и отдельных сборочных единиц. В этой технологической схеме сборки указываются и такие данные, как трудоемкость, вид оснастки, из какого цеха должны поступать детали и т. д. Отмечают также факт поступления на сборку тех или иных деталей.

Схема дает представление не только о последовательности сборки, но и о возможности организации параллельного выполнения работ. При наличии схемы специальные технологические карты на сборку часто не разрабатывают. На выполнение отдельных ответственных операций составляют типовые инструкции (например, на запресовку крупных деталей, балансировку, испытание и т. д.). На некоторых заводах дополнительные указания о выполнении работ наносят непосредственно на технологическую схему.

6.3. Методика типового проектирования технологических процессов обработки заготовок

Типовое проектирование технологического процесса обработки заготовок нашло широкое применение в условиях технологической подготовки мелкосерийного и серийного производства. Структурная схема процесса такого проектирования показана на рис. 6.16. Согласно этой схеме, процесс проектирования состоит из трех процедур (Пр).

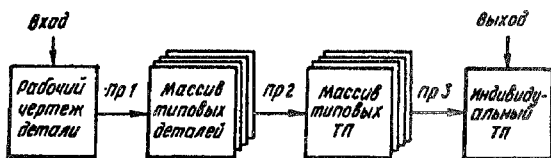


Рис. 6.16. Структурная схема процесса типового проектирования технологических процессов обработки заготовок деталей машин (Пр₁ — *i*-я процедура проектирования)

Процедура 1. По рабочему чертежу детали, технологический процесс изготовления которой необходимо спроектировать, из массива типовых деталей выбирается подходящая типовая деталь. Критериями сравнения

при выборе являются: конфигурация детали (состав типовых поверхностей и их относительное расположение), габаритные размеры, материал и параметры качества (твёрдость, качество точности и параметр шероховатости) ее типовых поверхностей. При этом должны соблюдаться приведенные ниже условия.

1. Множество типовых элементов формы (типовых поверхностей или функциональных модулей) детали, для изготовления которой разрабатывается конкретный техпроцесс, должно являться подмножеством множества элементов типовой детали. Это значит, что данная деталь не должна содержать типовых элементов формы, которых нет в типовой детали.

2. Множество видов относительного расположения типовых элементов формы конкретной детали должно также быть подмножеством множества видов относительного расположения элементов типовой детали. Например, на данной детали — ступенчатом валу — не должно быть отверстий, параллельных или перпендику-

лярных к главной оси вала, если таких отверстий нет у типовой детали.

3. Деталь, для изготовления которой проектируется техпроцесс, должна относиться к той же размерной группе (мелкие, небольшие, средние, крупные), что и типовая деталь.

4. Материал детали, для изготовления которой проектируется техпроцесс, должен быть одним из элементов множества возможных материалов типовой детали.

5. Твердость конкретной детали не должна быть большей, чем твердость типовой детали. Если на типовой детали не предусмотрены полная или частичная химико-термическая обработка и нанесение покрытия, то на данной детали эти показатели также должны отсутствовать.

6. Параметры качества (кавалитет точности размеров, допуски относительного расположения, степень точности формы, параметр шероховатости) типовых элементов конкретной детали должны быть больше или равны соответствующим параметрам качества типовой детали.

П р о ц е д у р а 2. По коду выбранной типовой детали подбирается код типового технологического процесса ее изготовления. Типовой технологический процесс представляет собой упорядоченный (по последовательности выполнения) набор описаний технологических операций и их элементов (переходов), необходимый и достаточный для изготовления типовой детали. Каждой операции и переходу соответствует набор логических условий назначения. Эти условия можно разбить на две группы. К первой группе относятся конструктивные условия, отражающие специфику формы, материала и качества детали, ко второй — размер партии и годовой выпуск деталей, для изготовления которых проектируется технологический процесс.

П р о ц е д у р а 3. «Доработка» типового технологического процесса, которая заключается:

- 1) в назначении операций и переходов, необходимых и достаточных для изготовления данной конкретной детали, путем сопоставления ее структуры и параметров с логическими условиями назначения, которые соответствуют операциям и переходам типового техпроцесса;
- 2) в назначении видов и параметров оборудования, приспособлений и инструментов, которые предусмотрены в типовом техпроцессе;
- 3) в назначении параметров режима резания и ППД и нормировании операций согласно таблицам, приведенным в типовом техпроцессе;

- 4) в оформлении технологической документации согласно ГОСТам.

К достоинствам метода типового проектирования можно отнести:

- 1) повышение производительности труда технолога, что приводит к сокращению сроков технологической подготовки производства;
- 2) повышение качества проектирования технологического процесса, так как при этом вероятность допущения ошибок даже технологом относительно низкой квалификации весьма невелика;
- 3) повышение уровня технологичности деталей, так как их классификация обязательно сопровождается унификацией и нормализацией функциональных элементов деталей;
- 4) повышение уровня качества технологической подготовки, так как разработка типовых технологических процессов предусматривает анализ и обобщение передового опыта предприятий отрасли, что способствует внедрению прогрессивных апробированных способов обработки и использованию перенастраиваемой (обратимой) оснастки. Кроме того, данный метод проектирования сравнительно просто автоматизировать с помощью ЭВМ.

К недостаткам типового проектирования следует отнести: сложность и трудоемкость его подготовки, т. е. разработки массивов типовых деталей и типовых технологических процессов; то, что технолог, использующий только данный метод проектирования, практически лишается условий для повышения квалификации.

Подготовка типового проектирования осуществляется обычно высококвалифицированным технологом и начинается с разработки классификатора типовых деталей. Выделение типовых деталей лучше всего осуществлять, пользуясь иллюстрированным определителем деталей общемашиностроительного применения и конструкторским архивом предприятия. Детали, отнесенные к одному типу, должны быть технологически подобными, т. е. их различия в структуре, параметрах и свойствах не должны превышать некоторых допустимых значений и должны позволять изготавливать эти детали в рамках одного типового технологического процесса.

Желательно, чтобы «допуск» на различие между типовыми деталями был оптимальным, так как его расширение усложняет выполнение третьей процедуры, а его сужение увеличивает объем массивов типовых деталей и типовых технологических процессов.

Типовой технологический процесс разрабатывается для типовой детали и затем проверяется на реальных деталях, которые уже

изготавливались на предприятии по внедренным технологическим процессам.

Возможен и другой (эволюционный) способ формирования массивов типовых деталей и технологических процессов. В этом случае множество деталей данного подкласса из изготавливаемых на предприятии приближенно делится на ряд технологически подобных. В каждой группе выбирается базовая (обычно наиболее сложная) деталь. Технологический процесс ее изготовления также считается базовым. Другие детали данной группы будут присоединяемыми.

Сопоставляя технологические процессы изготовления базовой и присоединяемой деталей, формируют (если это возможно) обобщенный технологический процесс. Простейший пример такого формирования показан на рис. 6.17, где O_{bj} — j -я операция обработки заготовки базовой детали, O_{ij} — j -я операция обработки заготовки i -й присоединяемой детали, O_{oj} — j -я операция обобщенного технологического процесса. Операции с одинаковыми кодами (j) имеют одинаковое содержание, т. е. одинаковый перечень переходов, одинаковые оборудование и оснастку. Базовая и присоединяемая детали различаются по структуре и параметрам качества, и поэтому для их обработки требуются и одинаковые, и разные операции. В обобщенный маршрут входят как одинаковые для обеих деталей, так и разные для них операции. Тут же формируются логические условия назначения разных операций. Объединением признаков базовой и присоединяемой деталей формируется новая базовая деталь, а обобщенный технологический процесс также становится базовым.

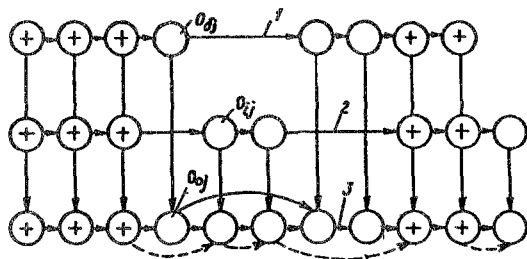


Рис. 6.17. Схема формирования обобщенного маршрута (стрелки 3) («+» — признак совпадения содержания операций базового (стрелки 1) и присоединяемого (стрелки 2) технологических процессов)

Сопоставляя последовательно все детали группы и технологические процессы их изготовления с базовыми, получают в конце концов типовую деталь и типовой технологический процесс. Такой подход к формированию массивов типовых деталей и типовых технологических процессов делает их открытыми для развития и совершенствования.

Сопоставляя последовательно все детали группы и технологические процессы их изготовления с базовыми, получают в конце концов типовую деталь и типовой технологический процесс. Такой подход к формированию массивов типовых деталей и типовых технологических процессов делает их открытыми для развития и совершенствования.

6.4. Методика индивидуального проектирования технологических процессов обработки заготовок

6.4.1. Порядок решения задачи

В условиях серийного, крупносерийного и массового производства или при проектировании технологических процессов изготовления оригинальных деталей использование методики типового проектирования становится неэффективным. В таких случаях следует применять методику индивидуального проектирования, которая отличается от методики типового проектирования технологического процесса прежде всего характером выбираемых типовых решений и наличием процедуры синтеза. Кроме того, она базируется на постоянном наращивании информации в процессе решения технологических задач на разных уровнях иерархии, т. е. последовательность решения частных задач проектирования определяется наличием необходимой информации. Генерируемая в процессе проектирования новая информация является основой для решения последующих более емких и сложных задач.

Технологическое проектирование процесса изготовления детали можно разделить на три группы задач, связанных с обеспечением: 1) заданной формы, размеров и шероховатости отдельных поверхностей; 2) заданного относительного расположения поверхностей детали; 3) высокой экономической эффективности процесса обработки. Первая группа задач обычно обеспечивается правильным выбором способа обработки, инструмента, вида размерной настройки и режимов резания, а также числом ступеней обработки поверхностей. Вторая группа задач реализуется точностью базирования и закрепления заготовки, точностью позиционирования узлов станка и индексации приспособлений. Третья группа задач определяется правильным выбором временной структуры операций и оптимизацией режимов обработки.

Для решения перечисленных выше задач необходима информация. Часть такой информации содержится в исходных данных, в том числе сведения о структуре и параметрах детали, производственной программе, возможностях заготовительного, термического и механического цехов. Другая часть информации, необходимой для решения технологических задач, генерируется в процессе проектирования. Эта часть информации является как бы промежуточной и в готовом технологическом процессе может отсутствовать в явном виде.

В соответствии с системным подходом сложный процесс индивидуального проектирования технологического процесса необходимо разделить на ряд иерархически соподчиненных подсистем так, чтобы уровень иерархии подсистемы проектирования определялся объемом

информации, необходимой для решения отнесенных к ней технологических задач. Поэтому вначале должны решаться только те задачи, информация о которых содержится в исходных данных. Кроме того, чтобы ослабить влияние ранее принятых решений на результаты последующих, необходимо при проектировании технологического процесса использовать принцип свободы выбора решений, который заключается в несколько неполной конкретизации промежуточных решений, т. е. в выборе не одного лучшего варианта, а некоторой их совокупности, близкой к оптимуму. Поэтому процесс индивидуального проектирования техпроцесса изготовления детали делится на следующие этапы и процедуры.

Э т а п 1 (подготовительный)

- Пр1. Анализ конструкторской информации.
- Пр2. Определение типа производства.
- Пр3. Выбор метода получения заготовки.

Э т а п 2 (синтетический)

- Пр4. Синтез вариантов маршрута обработки типовых поверхностей заготовки детали.
- Пр5. Синтез вариантов схем базирования.
- Пр6. Синтез маршрута обработки заготовки.
- Пр7. Синтез структуры операции. Окончательный выбор оборудования и оснастки.

Э т а п 3 (аналитический)

- Пр8. Размерный анализ технологического процесса.
- Пр9. Оптимизация режимов резания.
- Пр10. Нормирование и определение экономических характеристик спроектированного технологического процесса.

Э т а п 4 (заключительный)

- Пр11. Оформление технологической документации.

Размерный анализ может выполняться как проектная процедура, как средство определения причин, по которым действующий технологический процесс не обеспечивает требуемых показателей качества, или как одно из средств поиска способов совершенствования действующего технологического процесса. Первая разновидность размерного анализа позволяет: 1) устанавливать обоснованные операционные размеры и технические требования на всех операциях проектируемого технологического процесса; 2) обосновывать необходимые размеры заготовки, обеспечивающие минимальный расход металла; 3) оценивать надежность спроектированного технологического процесса с точки зрения обеспечения заданной точности чертежных размеров детали и других технических требований.

При выполнении размерного анализа необходимо: 1) назначить обоснованные допуски для операционных (технологических) размеров; 2) определить минимально необходимые припуски; 3) построить размерные схемы технологического процесса; 4) выявить размерные цепи; 5) осуществить проверочный расчет возможности обеспечения чертежных размеров; 6) определить номинальные значения операционных размеров путем решения размерных цепей.

Трудоемкость выполнения качественного размерного анализа значительна, однако эти затраты на стадии проектирования многократно окупаются при внедрении процесса в производство.

Далее рассматриваются цели и методы выполнения указанных процедур.

6.4.2. Анализ конструкторской информации

При выполнении анализа конструкторской информации решаются следующие задачи: преобразование конструкторской информации в форму, удобную для принятия технологических решений; проверка правильности простановки размеров и технических требований.

Для решения первой задачи необходимо: 1) отнести данную деталь к соответствующему классу, подклассу и группе; 2) выделить из детали комплекты поверхностей (или функциональных модулей), образующих основные и вспомогательные конструкторские базы, а также исполнительные поверхности (если они есть) и отметить связи между ними; 3) разделить «свободные» поверхности на две группы: обрабатываемые резанием и те, формообразование которых завершилось в процессе изготовления заготовки (литьем, штамповкой и т. д.); 4) провести классификацию обрабатываемых поверхностей по форме (см. рис. 1.4...1.9); 5) оценить необходимую точность и шероховатость каждой классификационной группы поверхностей; 6) выделить поверхности, для которых заданы дополнительные требования к точности относительного расположения.

Такое упорядочение конструкторской информации позволяет легче удерживать в памяти «образ» детали и принимать решения не по каждой отдельной поверхности, а по их однородным группам. На рабочих чертежах деталей, заготовки которых изготавливают литьем или ковкой (штамповкой) с последующей обработкой части поверхностей резанием, должны быть проставлены две группы размеров. Одна из них связывает между собой поверхности, полученные на заготовительном этапе формообразования детали, и эти размеры в дальнейшем будем называть исходными; другая группа определяет связи окончательно обработанных поверхностей. Эти две группы размеров должны быть связаны между собой только одним размером

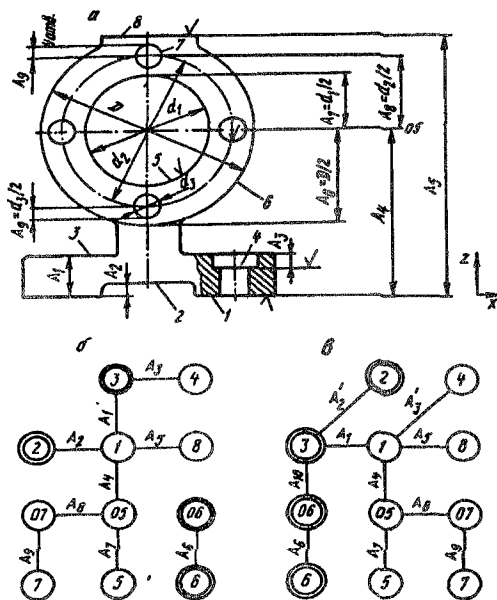


Рис. 6.18. Схема простановки размеров по оси Z (а), соответствующий ей (б) и исправленный (в) графы размерных связей

в каждом из трех координатных направлений. Простановка размеров для группы обработанных поверхностей должна позволять выполнение обработки с автоматическим получением размеров на настроенных станках и по возможности обеспечивать равенство нулю погрешности схемы базирования.

Формально проверка правильности простановки размеров может быть осуществлена с помощью графов размерных связей. Граф на плоскости изображается множеством соответствующих поверхностям вершин, соединенных дугами (или ребрами), каждая из которых соответствует размеру, связывающему две поверхности.

Граф размерных связей строится для каждой из координатных осей. На рис. 6.18 показан пример проверки правильности простановки размеров по оси Z с помощью графа размерных связей. На эскизе детали знаком параметра шероховатости отмечены обработанные поверхности. На графе исходные поверхности отмечены двойной окружностью. Номер внутри окружности соответствует номеру поверхности. Симметрично расположенные поверхности, в частности поверхности вращения, на графе отражены двумя вершинами, одна из которых — ось симметрии. Таким образом, ось

представляет собой условную поверхность и номер ее состоит из символов O и N , где N — номер поверхности.

Если размеры проставлены правильно, то граф размерных связей отвечает следующим требованиям; 1) на графе нет оторванных групп вершин (если они есть, то это значит, что не хватает размеров или технических требований); 2) на графе нет замкнутых контуров (если они есть, то это значит, что проставлены лишние размеры); 3) группы исходных и обработанных поверхностей имеют только одну общую дугу.

Граф размерных связей, построенный в соответствии с проставленными размерами (рис. 6.18, б), наглядно показывает, что в постановке размеров имеются ошибки. Во-первых, нет требований по допустимому смещению осей отверстия 5 и наружной цилиндрической поверхности 6. Во-вторых, между исходными и обработанными поверхностями существует несколько связей (дуги A_1 , A_2 и, если связать поверхности O_5 и O_6 , дуга $O \pm T$, где T — допуск на смещение осей). Один из вариантов исправления графа размерных связей показан на рис. 6.18, в), причем размер A_{10} должен обязательно быть проставлен на заготовке.

6.4.3. Определение типа производства

Каждому типу производства соответствует определенная организационно-техническая характеристика. В технической литературе приводятся таблицы такого соответствия, составленные на основе обобщения опыта передовых машиностроительных предприятий. Эти таблицы соответствия периодически пересматриваются и дополняются. Их содержание (например, табл. 6.4) используют для принятия следующих предварительных решений: о степени детализации проектирования технологического процесса, о структуре операций, о видах оборудования и оснастки, о методах обеспечения точности и т. д.

Согласно ГОСТу, основной характеристикой типа производства является коэффициент $K_{3.0}$ закрепления операций, равный отношению всех различных технологических детали-операций, выполненных или подлежащих выполнению в течение месяца в каком-либо подразделении механического цеха, к числу рабочих мест. Для массового производства принимают $K_{3.0} = 1$, для крупносерийного производства $1 < K_{3.0} \leq 10$, для серийного производства $10 < K_{3.0} \leq 20$, для мелкосерийного производства $20 < K_{3.0} \leq 40$.

В проектных условиях можно полагать, что $K_{3.0}$ определяет число операций такой же трудоемкости, как и рассматриваемая, которые

можно было бы закрепить за одним рабочим местом для его полной загрузки в течение месяца. Тогда коэффициент закрепления операций определяется выражением (аналогичным формуле (6.2))

$$K_{30} = \tau_{\text{вып}} / \tau_{\text{шт}} = (60\Phi m_1 \eta) / (N_r \tau_{\text{шт}}), \quad (6.3)$$

где $\tau_{\text{вып}}$ — такт выпуска; $\tau_{\text{шт}}$ — штучное время (ориентировочное); Φ — номинальный годовой фонд времени при односменной работе, $\Phi = 2070$ ч; m_1 — принятое число смен в сутки; η — коэффициент использования оборудования, $\eta = 0,9 \dots 0,98$; N_r — годовая программа выпуска деталей с учетом запасных частей.

Табл. 6.4 Организационно-технические характеристики типов производства

Характеристика	Тип производства			
	массовое	крупносерийное	серийное	мелкосерийное
Проектирование технологических процессов по их детализации	Операционное	Операционное	Маршрутно-операционное	Маршрутное
Оборудование	Специальное	Специальное и специализированное	Универсальное, станки с ЧПУ, специализированное	Универсальное, станки с ЧПУ
Приспособления	Специальные неразборные (НСП)	Специальные неразборные, сборно-разборные (СРП), специализированные наладочные (СНП)		Универсально-безналадочные (УБП), универсально-сборные (УСП)
Структура операции	$\Pi_n^2, I_1^0, I_m^2, D_k^1, D_k^2, Z_2^{\text{нд}}, Z_2^{\text{н}}$	$\Pi_1^0, \Pi_n^2, I_m^1, I_m^2, D_k^1, D_k^2, D_1^0, Z_1^{\text{нд}}, Z_2^{\text{нд}}$		$\Pi_1^0, I_1^0, I_m^1, D_1^0, Z_1^{\text{нд}}$
Базирование	Сопряжением	Сопряжением	Выверкой, сопряжением	Выверкой по разметке
Размерная настройка	На партию с ручной или автоматической коррекцией		На партию с ручной коррекцией	Индивидуальная, пробных стружек

Ориентировочное штучное время для главных операций проектируемого технологического процесса проще всего определять по деталям-аналогам, технологические процессы изготовления которых

(6.3), вычислить для выделенных операций значения коэффициента $K_{3.0}$ закрепления операций. При этом может оказаться, что для разных операций получаются разные типы производства.

6.4.4. Выбор метода изготовления заготовок

Методы изготовления заготовок деталей машин определяются технологическими свойствами их материала, формой, габаритами и объемом (типом) производства. В действующем производстве учитываются возможности заготовительных цехов (наличие соответствующего оборудования) и плановые сроки подготовки производства (проектирование и изготовление технологической оснастки). Кроме того, принимаются во внимание прогрессивные тенденции развития технологии машиностроения, в соответствии с которыми рекомендуется (в случае целесообразности) переносить большую часть процесса формообразования детали на заготовительную стадию и тем самым снижать расход материала и долю затрат на механическую обработку. В большинстве случаев производительность заготовительных процессов на порядок выше производительности процессов механической обработки.

По мере усложнения конфигурации заготовки (т. е. приближения ее формы к форме детали) и повышения ее точности усложняется и удорожается технологическая оснастка заготовительного цеха и соответственно возрастает себестоимость заготовки. Но при этом снижаются трудоемкость и себестоимость последующей механической обработки. Заготовки простой конфигурации (с напусками) дешевле, так как не требуют при изготовлении сложной и дорогостоящей технологической оснастки. Однако такие заготовки требуют последующей трудоемкой обработки и повышенного расхода материала. Очевидно, что для каждого конкретного метода изготовления заготовки существуют оптимальная точность и оптимальный объем выпуска.

Класс методов изготовления заготовки определяется конфигурацией детали и ее материалом. Всего в машиностроении используются пять классов методов изготовления заготовок: 1) отделение (отрезание, вырезание) от сортового проката (прутки, листы и т. д.); 2) обработка давлением; 3) литье; 4) порошковая металлургия; 5) комбинированные методы (штампосварные и литосварные заготовки), в которых сварка служит для соединения отдельных частей заготовки, предварительно изготовленных литьем, штамповкой или отделением от проката.

Для отделения заготовок от листового проката может использоваться один из следующих способов: 1) газовая (ацетиленокислородная, кислородно-флюсовая или плазменно-дуговая) резка из листового проката толщиной до 100...200 мм, которая обеспечивает

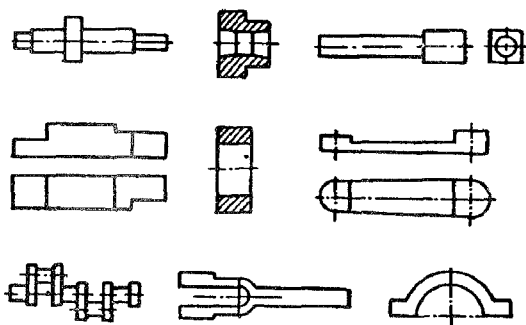


Рис. 6.20. Основные типы заготовок, изготовленных ковкой

точность при ручном вырезании $\pm(4...10)$ мм, а при машинном $\pm(1...2)$ мм; 2) резка на пресс-ножницах с прямыми и фасонными ножами, позволяющая с точностью $\pm(1...6)$ мм отрезать заготовки от листового проката толщиной до 25 мм, а также от квадратного и круглого проката диаметром до 200 мм;

3) резка на гильотинных ножницах с точностью $\pm(0,25...3)$ мм листов толщиной до 20 мм; 4) резка на дисковых ножницах с точностью $\pm(0,25...0,6)$ мм листов толщиной до 20 мм.

Отрезание заготовок от круглого проката может осуществляться на механических или гидравлических прессах, на дисковых или ленточных пилах, на приводных ножовках, на фрезерно-отрезных, токарно-отрезных, абразивно-отрезных станках и установках. На токарно-отрезных станках выгодно отрезать заготовки из труб. Точность отрезания — от $\pm 0,3$ до ± 4 мм в зависимости от способа.

Заготовки из круглого проката применяются в основном в мелкосерийном производстве или в тех случаях, когда разность в диаметрах ступеней детали мала (ходовые винты, риф-цилиндры прядильных машин и т. д.).

Обработка заготовок давлением реализуется путемковки, штамповки и других способов. Ковкой получают заготовки относительно простой формы со значительными припусками. Для упрощения формы заготовки на ней часто оставляют напуски. Применение подкладных штампов позволяет получать заготовки с относительно сложной формой и повышать их точность. Основные типы поковок показаны на рис. 6.20. Свободная ковка применяется главным образом в условиях мелкосерийного производства и для получения крупных поковок массой до 250 т. Качество точности заготовок от IT19 до IT20.

В целях снижения трудоемкости свободнойковки заготовки должны ограничиваться плоскими и(или) цилиндрическими поверхностями. Нежелательны конические и клиновые формы поковок, пересечения цилиндрических поверхностей. Односторонние выступы предпочтительнее двусторонних. Нельзя выполнять ковкой ребра жесткости.

Для горячей штамповки используется один из следующих спо-

собо́в: штамповка в открытых или закрытых штампах; штамповка выдавливанием и прошивкой; штамповка в штампах с разъемными матрицами на прессах или горизонтально-ковочных машинах (ГКМ); штамповка на ковочных вальцах; штамповка на радиально-обжимных машинах (ротационная ковка); штамповка с комбинированием нескольких способов. При штамповке в закрытых штампах получают более точные заготовки и расходуют меньше материала, чем в открытых. Однако закрытые штампы несколько ограничивают форму заготовки (преимущественно тела вращения).

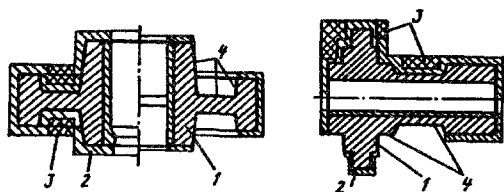


Рис. 6.21. Соответствие формы детали и заготовки, полученной свободной ковкой и штамповкой в открытом штампе и на ГКМ; 1 — деталь; 2 — припуск; 3 — напуск; 4 — «исходные» поверхности детали

Штамповка в открытых штампах позволяет получать заготовки, форма которых существенно приближается к форме детали. Но углубления и отверстия в направлении, перпендикулярном к ходу молота или пресса, невозможны. Их можно выполнять при штамповке с разъемными матрицами на ГКМ. На рис. 6.21 показана степень соответствия формы детали и заготовки в зависимости от способа формообразования.

Точность изготовления заготовки в открытых штампах зависит от группы ее материала, массы и степени сложности. К первой группе материалов относятся стали, содержащие углерода менее 0,45% и легирующих элементов 2%. Другие стали относятся ко второй группе. Различают четыре степени сложности поковок в зависимости от значения коэффициента $C = G_{\text{пок}}/G_{\text{фиг}}$ (здесь $G_{\text{пок}}$, $G_{\text{фиг}}$ — массы соответственно поковки и простой фигуры, в которую вписывается поковка). Для первой степени сложности $C = 0,63...1$, для второй $C = 0,32...0,63$, для третьей $C = 0,16...0,32$, для четвертой $C < 0,16$.

Допуски на изготовление заготовок из материалов второй группы в открытых штампах на 20...30% больше, чем из материалов первой. А допуски на изготовление заготовок четвертой степени сложности в открытых штампах на

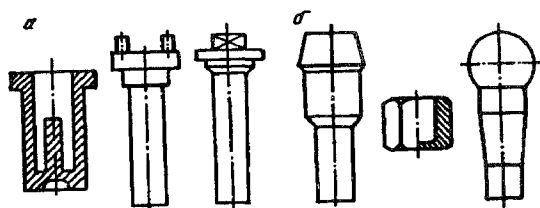


Рис. 6.22. Типовые заготовки, получаемые холодной штамповкой выдавливанием (а) и холодной высадкой (б)

30...40% больше, чем допуски первой степени. Поковки, полученные в закрытых штампах, примерно на один квалитет точности точнее, чем в открытых. С увеличением массы заготовок с 10...20 кг до 100...160 кг их точность при изготовлении в открытых штампах снижается на 2 квалитета. Для повышения точности штампованных заготовок после горячей объемной штамповки выполняют горячую или холодную калибровку. При этом точность увеличивается на 3...5 квалитетов, а параметр Ra уменьшается в 4...6 раз (до 2,5...0,8 мкм).

Некоторые заготовки, изготовленные холодной объемной штамповкой выдавливанием и холодной высадкой, показаны на рис. 6.22. Такие заготовки можно получать из стали и деформируемых сплавов на основе алюминия и меди. Исходными заготовками обычно служат прутки, трубы и проволока. Иногда процессы высадки и выдавливания совмещаются. Холодная высадка осуществляется на высокопроизводительных автоматах из калиброванного материала. Характеристики точности и качества поверхности заготовок, изготовленных обработкой давлением, приведены в табл. 6.5. Они относятся к поковкам массой 10...20 кг.

Табл. 6.5. Точность размеров и шероховатость поверхности стальных поковок

Способ обработки давлением	Квалитет точности	Параметр Ra , мкм
Свободная ковка:		
стержней, валов и дисков	18...19	30...60
полых валов и цилиндров	19...20	30...60
Штамповка:		
в открытых штампах	16...17	6...12
с горячей калибровкой	13...16	1...2,5
на ГKM	13...15	2,5...5
Ротационная ковка	10...12	1...2,5
Холодная объемная штамповка выдавливанием	8...11	0,8...1,6
Холодная высадка	8...9	0,8...2,5

Среди отливок до 80% по массе занимают заготовки, изготовленные литьем в песчаные формы. Этот способ является универсальным применительно к литейным материалам, а также к массе и габаритам отливки. Специальные способы литья значительно повышают стоимость отливки, но позволяют отливать заготовки повышенного качества с минимальным объемом механической об-

работки (табл. 6.6). Точность размеров отливки зависит не только от технологии ее производства, но и от условий формирования элементов отливки в форме. По этому признаку установлены три вида размеров: 1) размеры элементов отливки, образованных одной частью формы или одним стержнем; 2) размеры элементов отливки, образованных двумя полуформами, а также перпендикулярных к плоскости разъема; 3) размеры элементов отливки, образованных тремя и более частями формы, а также толщины стенок, ребер и фланцев.

Табл. 6.6. Точность размеров и шероховатость поверхности отливок

Способ литья	Квалитет точности; параметр шероховатости Ra , мкм, для материала		
	легкие цветные сплавы	чугун серый	чугун ковкий, сталь
Под давлением	11...13; до 0,63	12...14; более 1,25	—
В керамические формы и по выплавляемым моделям	12...14; 1...2,5	13...15; 2,5...5	14...15; 2,5...5
В кокиль и оболочковые формы	13...17; 2,5...5	14...17; 5...10	15...18; 10...20
В песчано-глинистые формы и центробежное	14...18; 5...10	15...19; 10...20	16...20; 10...20

По конфигурации отливки делятся на пять групп сложности. К первой группе относятся отливки простой геометрической формы с наличием невысоких ребер, бобышек, фланцев, выступов и углублений. Наружные поверхности формируются без стержней или съемных частей. Внутренние полости неглубокие, выполняются преимущественно «болваном» или простым стержнем.

Ко второй группе относятся отливки в виде сочетания простых геометрических тел (плит, цилиндрических или открытых коробчатых форм). Наружные поверхности таких отливок плоские и криволинейные при наличии ребер, бортов, бобышек, фланцев, отверстий и углублений простой конфигурации. Внутренние полости простые, большой протяженности или высокие. Для выполнения отдельных частей отливки применяются стержни.

К третьей группе относятся отливки открытой коробчатой или другой формы. Плоские и криволинейные наружные поверхности имеют нависающие части, ребра, бобышки и фланцы с отверстиями и углублениями относительно сложной конфигурации. Внутренние полуоткрытые полости представляют собой объединение нескольких простых геометрических элементов, которые имеют большую про-

тяженность или высоту. У них в одном либо двух ярусах наблюдаются незначительные углубления или выступы.

К четвертой группе относятся отливки закрытой и частично открытой коробчатой и цилиндрической формы. Наружная поверхность такая же, как и у отливок третьей группы. Многие части выполняются с помощью стержней. Внутренние элементы отливки имеют сложную конфигурацию со значительными выступами и углублениями, расположены в один-два яруса и имеют один-два свободных выхода.

К пятой группе относятся отливки закрытой коробчатой формы. Наружные поверхности имеют сложную конфигурацию с примыкающими и пересекающимися конструктивными элементами. В процессе изготовления могут применяться стержни. Внутренние полости также имеют сложную конфигурацию с криволинейными поверхностями, которые пересекаются под разными углами и образуют выступами и выемками.

Квалитеты точности, указанные в табл. 6.6, соответствуют диапазону изменения групп сложности отливок от первой до пятой и второму виду размеров. Точность размеров первого и третьего видов на один квалитет соответственно выше и грубее (ниже).

Для выбора способа изготовления заготовки можно пользоваться *методом весовых коэффициентов*. Суть метода в следующем. Заготовка характеризуется рядом критериев, отражающих ее форму, массу, габаритные размеры, сложность и параметры качества. Каждый критерий выбора имеет несколько уровней значений. А каждому уровню критерия выбора и типу производства соответствует ряд весовых коэффициентов, значение которых зависит от способа изготовления заготовки. В табл. 6.7 приведены значения весовых коэффициентов для различных способов получения литых заготовок. Способ использования табл. 6.7 поясним следующим примером.

Предположим, что по чертежу детали, заготовку которой необходимо получить литьем, определены следующие критерии выбора: 1) тип производства — крупносерийное; 2) материал — силумин; 3) масса детали — 6 кг; 4) группа сложности — 3-я; 5) параметр шероховатости исходных поверхностей $Ra = 0,8$ мкм; 6) форма детали — корпусная; 7) минимальный габаритный размер — 240 мм; 8) квалитет точности размеров, связывающих исходные поверхности, — IT12. Соответствующие данным уровням критериев выбора значения весовых коэффициентов заносим в табл. 6.8 и затем находим их суммы по столбцам, соответствующим разным способам получения отливки. Выбирается тот способ, сумма весовых коэффициентов которого наибольшая. В данном случае это будет литье под давлением.

Табл. 6.7. Весовые коэффициенты критериев выбора способа изготовления отливки

Номер и наименование критерия выбора	Уровень, градация и значение критерия выбора	Способ изготовления литой заготовки						
		ЛПФ		ЛОФ	ЛВМ	ЛК	ЛПД	ЦЛ
		РФ	МФ					
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1. Тип производства	1. Мелкосерийное	2	0	0	0	0	0	0
	2. Серийное	1	1	1	1	1	1	1
	3. Крупносерийное	0	2	2	2	1	2	1
2. Материал детали	1. Сталь	1	1	0	1	1	0	0
	2. Чугун	1	1	1	0	1	0	1
	3. Цветные сплавы	1	1	1	1	1	1	1
3. Масса детали, кг	1. 50...60	1	1	1	1	1	1	1
	2. 60...120	1	1	1	1	1	0	1
	3. 120...320	1	1	1	0	1	0	0
	4. 320...600	1	1	1	0	0	0	0
4. Группа сложности отливки	1. 1	1	1	0	0	1	0	1
	2. 2	1	1	0	0	1	1	2
	3. 3	1	1	1	1	0	1	0
	4. 4	1	1	1	1	0	1	0
	5. 5	1	1	0	0	0	0	0
5. Параметр Ra поверхности заготовки, мкм	1. 0,63...1	0	0	0	0	0	2	0
	2. 1,6...3,2	0	0	0	2	0	1	0
	3. 6,3...12	0	1	2	1	2	0	1
	4. 12,5...20	2	2	1	0	1	0	1
6. Форма детали	1. Тела вращения	1	1	1	1	1	1	1
	2. Корпусные	1	1	1	0	1	1	0
	3. Рычаги	1	1	1	1	1	1	0
	4. Фасонные	1	1	1	1	0	1	1

1	2	3	4	5	6	7	8	9
7. Максимальные габаритные размеры, мм	1. До 25	0	0	0	1	0	1	1
	2. 25...50	0	1	1	1	0	1	1
	3. 50...120	1	1	1	1	1	1	1
	4. 120...400	1	1	1	0	1	1	1
	5. 400...1600	1	1	0	0	0	0	0
8. Качество точности размеров	1. 11...13	0	0	0	1	0	1	0
	2. 13...15	0	0	1	1	1	1	0
	3. 15...17	0	1	1	0	1	0	1
	4. 17...20	1	1	0	0	0	0	1

Примечание. ЛПФ — литье в песчаные формы; РФ — ручная формовка; МФ — машинная формовка; ЛОФ — литье в оболочковые формы; ЛВМ — литье по выплавляемым моделям; ЛК — литье в кокиль; ЛПД — литье под давлением; ЦЛ — центробежное литье.

Табл. 6.8. Значения весовых коэффициентов для данной детали

Номер критерия выбора (по табл. 6.7)	Уровень критерия	Способ литья						
		ЛПФ		ЛОФ	ЛВМ	ЛК	ЛПД	ЦЛ
		РФ	МФ					
1	3	0	2	2	2	1	2	1
2	3	1	1	1	1	1	1	1
3	1	1	1	1	1	1	1	1
4	3	1	1	1	1	0	1	0
5	1	0	0	0	0	0	2	0
6	2	1	1	1	0	1	1	0
7	4	1	1	1	0	1	1	1
8	1	0	0	0	1	0	1	0
С у м м а		5	7	7	6	5	10	4

Если конкурирующие способы набирают одинаковую сумму, то выбирается тот из них, который обеспечивает минимум затрат на изготовление заготовки и ее механическую обработку. Затраты на изготовление заготовки можно оценить по следующей эмпирической формуле:

$$C_3 = Am^{a_1}A_1^{a_2}N_G^{a_3}K_{\text{точ}} + \alpha m, \quad (6.5)$$

где A — коэффициент, значение которого зависит от материала заготовки и способа ее получения; m — масса детали, кг; A_1 — коэффициент учета группы сложности заготовки; N_G — годовая программа выпуска, шт.; $K_{\text{точ}}$ — коэффициент, учитывающий качество точности заготовки; α — постоянный коэффициент, учитывающий дополнительный расход материала на заготовку; a_1, a_3 — показатели степени; a_2 — показатель степени, равный номеру группы сложности заготовки.

Табл. 6.9 Значения параметров формулы (6.5)

Материал отливки	A	a_1	a_3	A_1
<i>Литье в песчаные формы</i>				
Чугун	0,417	0,900	-0,055	1,182
Сталь	0,477	0,897		
<i>Литье в оболочковые формы</i>				
Чугун	0,707	0,891	-0,056	1,132
Сталь	0,929	0,871		
<i>Литье в кокиль</i>				
Чугун	0,652	0,860	-0,097	1,191
Сталь	0,714	0,868		
<i>Центробежное литье</i>				
Чугун	0,437	0,871	-0,076	1,181
Сталь	0,477	0,878		
<i>Литье по выплавляемым моделям</i>				
Сталь:				
углеродистая	2,714	0,683	-0,092	1,1
легированная	3,250	0,697		

Для литых заготовок из черных сплавов $\alpha = 1$; коэффициент $K_{\text{точ}}$ зависит от качества точности ИТ заготовки следующим образом:

ИТ	.....	17...20	15...16	13...14
$K_{\text{точ}}$	.....	1	1,05	1,13

Значения других параметров формулы (6.5) приведены в табл. 6.9.

Затраты на механическую обработку заготовки можно оценить по следующей эмпирической модели:

$$C_{\text{м.о}} = B m^{b_1} B_1^{a_2-1} N_{\Gamma}^{b_2},$$

где B — коэффициент, зависящий от вида материала заготовки и способа ее получения; B_1 — коэффициент для учета влияния группы сложности заготовки; b_1, b_2 — показатели степени. Для литых заготовок из черных металлов указанные параметры принимают следующие значения:

Материал	B	b_1	B_1	b_2
Чугун	3,185	0,523	1,294	-0,197
Сталь углеродистая	5,469	0,511	1,294	-0,227

Из двух или трех конкурирующих способов с одинаковой суммой весовых коэффициентов выбирается тот, для которого сумма C_3 и $C_{\text{м.о}}$ будет минимальной (полученные по формулам значения C_3 и $C_{\text{м.о}}$ соответствуют уровню цен 1990 г.).

Аналогично можно выбрать наиболее подходящий способ обработки давлением, но метод весовых коэффициентов для них еще не разработан.

6.4.5. Синтез маршрута обработки типовых поверхностей заготовки

В процессе обработки поверхности и материал заготовки изменяют свое состояние от исходного C_0 до конечного $C_{\text{кн}}$. Состояние типовой поверхности характеризуется следующим символьным рядом:

$$C_i = \langle K\Phi_i, \{A_j, TA_j\}_i, Ra_i, H_i \rangle,$$

где $K\Phi_i$ — код формы поверхности в i -м состоянии; A_j — элемент множества размеров, характеризующих поверхность и ее относи-

тельное расположение; TA_j — параметр точности размера A_j ; Ra_i — параметр шероховатости поверхности в i -м состоянии; H_i — характеристика твердости подповерхностного слоя материала.

Промежуточное или окончательное состояние типовой поверхности достигается в результате выполнения технологических переходов. Изменение состояния поверхности от исходного до конечного, как правило, осуществляется за несколько технологических переходов, по мере выполнения которых постепенно повышается качество поверхности (точность размера и формы, точность положения, качество подповерхностного слоя материала и т. д.). Каждое изменение состояния поверхности может осуществляться разными способами и на различном оборудовании.

Функция способа обработки M как преобразование поверхности из состояния C_{i-1} в более точное состояние C_i может быть отражена условно дугой графа $C_{i-1}MC_i$ с вершинами C_{i-1} и C_i . Если состояние C_i может быть достигнуто различными способами обработки M_1, M_2, \dots, M_b , то совокупность их функций образует подграф с вершиной C_i . Множество состояний поверхности и способов их достижения можно отразить графом возможных вариантов маршрута ее обработки. Пример такого графа показан на рис. 6.23. Любой путь на графе из C_0 (в данном случае два варианта исходных состояний C_{01} и C_{02}) в конечное состояние $C_{\text{кн}}$ будет одним из вариантов маршрута обработки типовой поверхности.

Каждый способ (переход) характеризуется не только параметрами состояния поверхности, которые образуются после его реализации («выходом»), но и параметрами состояния поверхности на «входе», т. е. на заготовке (исходной или промежуточной). Кроме того, характеристикой выхода является удельная производительность способа (либо затраты основного времени).

Синтез маршрута обработки типовых поверхностей можно осуществить одним из двух методов, различающихся объемом используемых локальных типовых решений. В первом, условно названном *методом последовательного уточнения*, в качестве локального типового решения используется типовой переход. Во втором, названном *методом типовых маршрутов*, в качестве локального типового решения принимаются типовые планы (маршруты) обработки типовых поверхностей.

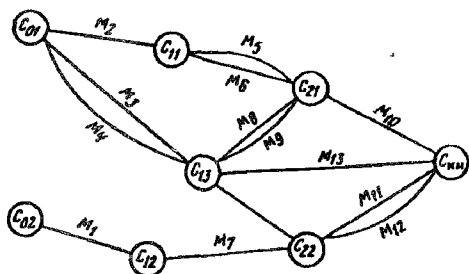


Рис. 6.23. Граф возможных вариантов маршрутов обработки типовой поверхности

Для реализации первого метода синтеза необходим массив локальных типовых решений, оформленный в виде таблицы, которая содержит необходимую для принятия решения информацию о входе и выходе данного перехода. Фрагмент такого массива показан в табл. 6.10. Код перехода может быть цифровым или символьным. При работе с таблицей без ЭВМ символьный код удобнее, особенно если он представляет собой сокращенное название перехода. Массив обычно разбивается на части, в каждой из которых содержатся переходы для обработки поверхностей одного класса.

Табл. 6.10. Массив переходов обработки поверхностей вращения

Код перехода	Параметры состояния поверхности				Коэффициент k в формулах (6.4)
	на входе		на выходе		
	IT	Ra , мкм	IT	Ra , мкм	
ОБТП	16...20	40...80	12...14	6,3...32	0,000075
ОБТО	10...20	40...80	11, 12	2,5...20	0,00015
ОБТЧ	13...15	20...32	8...10	1,25...6,3	0,000175
ОБТТ	9...11	1,2...6,3	6...9	0,4...1,6	0,000325
ШКНП	12...14	40...80	8...10	0,6...6,3	0,00012
ШКНО	12...14	40...80	6...8	0,2...3,2	0,000175
ШКНЧ	9, 10	3,2...6,3	6, 7	0,2...2,5	0,000184
ШКНТ	7, 8	1,25...2,5	5, 6	0,1...1,25	0,000065
ЗНКЧ	10...13	6,3...20	8, 9	0,4...3,2	0,00021
РАЗП	12...14	6,3...20	10, 11	0,8...6,3	0,00436

Примечание. В табл. 6.10 и 6.11 буквы П, Ч, Т, О в конце кода обозначают соответственно предварительную, чистовую, тонкую и однократную обработку; ОБТ — обтачивание; ШКН — круглое врезное наружное шлифование; ЗНК — зенкерование; РАЗ — развертывание.

Стратегию синтеза вариантов маршрута обработки типовых поверхностей можно пояснить следующим примером. Предположим, что обработке подлежит наружная цилиндрическая поверхность с параметрами исходного C_0 ($IT18$, $Ra = 40$ мкм) и конечного $C_{кн}$ ($IT7$, $Ra = 0,8$ мкм) состояний. Достигнуть заданного качества $C_{кн}$ можно, согласно табл. 6.10, применением следующих переходов: ОБТТ, ШКНЧ, ШКНО. Требования к точности размеров на входе в эти переходы выше, чем требования к заготовке, поэтому необходима предварительная обработка. Требования к точности на входе

для переходов ОБТТ и ШКНЧ близки, поэтому можно считать, что перед их реализацией обрабатываемая поверхность будет иметь одно и то же состояние. А для перехода ШКНО требования к точности ниже. В результате первого шага синтеза получен фрагмент графа вариантов маршрута обработки данной типовой поверхности, показанный на рис. 6.24,а.

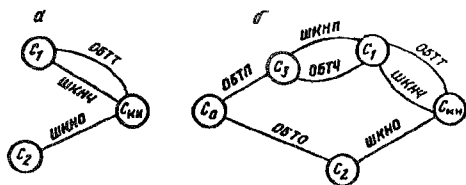


Рис 6.24 Схемы синтеза вариантов маршрута обработки типовой поверхности

На следующем шаге синтеза состояния C_1 и C_2 будут характеризовать выход для переходов промежуточной обработки. Требования состояния C_1 могут быть достигнуты при применении переходов ОБТЧ и ШКНП (см. табл. 6.10). Требования к точности размеров на входе в эти переходы также выше, чем требования к заготовке. Они близки, и поэтому можно считать, что перед реализацией переходов ОБТЧ и ШКНП обрабатываемая поверхность будет иметь одно и то же состояние (C_3).

Требования состояния C_2 могут быть достигнуты переходом ОБТО. При этом требования состояния на входе в этот переход соответствуют требованиям исходного состояния. И, наконец, требования состояния C_3 , согласно табл. 6.10, могут быть достигнуты применением перехода ОБТП. Окончательно граф вариантов возможных маршрутов обработки данной типовой поверхности показан на рис. 6.24,б. Всего возможны пять вариантов маршрута. Их количество можно уменьшить, если учесть условия и возможности выполнения перехода по твердости. Так, если после термической обработки (ТО) в виде закалки твердость данного материала будет больше указанной в соответствующем столбце массива переходов, фрагмент которого представлен в табл. 6.10, то такой переход выполнять нерационально или невозможно. В этом случае, учитывая, что закалка обычно выполняется после предварительной обработки, необходимо удалить из полученного графа дуги ОБТЧ и ОБТТ.

Следующий шаг сокращения возможного числа вариантов состоит в их сравнении по затратам основного времени, которое можно определить по формулам (6.4). Так, если твердость данной поверхности меньше 28 единиц по шкале C_3 Роквелла, то суммарное основное время τ_0 по всем вариантам маршрута будет следующим:

$$\tau_{01} = (0,000075 + 0,000175 + 0,000184)dl = 0,000434dl;$$

$$\tau_{02} = (0,000075 + 0,000175 + 0,000325)dl = 0,000575dl;$$

$$\tau_{03} = (0,000075 + 0,000120 + 0,000184)dl = 0,000379dl;$$

$$\tau_{04} = (0,000075 + 0-000120 + 0,000325)dl = 0,000520dl;$$

$$\tau_{05} = (0,000150 + 0,000175)dl = 0,000325dl.$$

Следовательно, самым производительным будет маршрут, состоящий из двух переходов — ОБТО и ШКНО. Для дальнейшего рассмотрения можно включить еще один конкурирующий маршрут, стоящий по производительности на втором месте и содержащий переходы ОБТП, ШКНП, ШКНЧ.

Метод типовых маршрутов можно использовать при наличии соответствующего массива, также оформленного в виде таблиц, в которых в зависимости от конечного состояния типовой поверхности и материала задаются варианты маршрута ее обработки. Фрагмент такого массива приведен в табл. 6.11. Достоинством этого метода является его относительная простота. Однако он предполагает, что состояние заготовки для всех вариантов одно и то же. Если каждому маршруту в массиве поставить в соответствие сумму соответствующих переходам коэффициентов k из формул (6.4), то можно сравнить варианты маршрутов по технологической производительности.

Табл. 6.11 Массив типовых маршрутов обработки наружных поверхностей вращения

Коды материала	Квалитет точности	Параметр R_a , мкм	Коды переходов маршрута
СН, Ч, Ц	10, 11	2,5...5	ОБТП, ОБТЧ
СЗ			ОБТП, ШКНО
СН, Ч, Ц	7...9	0,63...1,25	ОБТО, ТО, ШКНО
СН			ОБТП, ОБТЧ, ОБТТ
СЗ			ОБТО, ШКНО
Ц	7. 9	0,16. 0,32	ОБТО, ТО, ШКНО
СЗ			ОБТП, ОБТЧ, ПОЛО
СН, Ч, Ц	6	0,16...0,32	ОБТП, ОБТЧ, ОБТТ
СН			ОБТО, ШКНП, ШКНТ, ПОЛО
СЗ			ОБТО, ШКНО, СФНО
			ОБТО, ТО, ШКНП, ШКНТ
			ОБТО, ТО, ШКНЧ, СФНО

Примечание. СН — сталь незакаленная; СЗ — сталь закаленная; Ч — чугун; Ц — цветные сплавы; ПОЛ — полирование; СФН — суперфиниширование наружное; ТО — термическая обработка.

При выборе (синтезе) маршрутов обработки типовых поверхностей заготовки детали следует не только стремиться к минимизации затрат времени на каждый маршрут, но и обеспечить возможность выполнения всех переходов, необходимых для обработки заготовки с использованием минимального ассортимента оборудования, приспособлений и инструментов. Например, у корпусной детали имеется группа плоских поверхностей, обработка которых наружным протягиванием будет самой производительной. Но другую группу плоских поверхностей обработать протягиванием невозможно, и поэтому выбирают вариант маршрута обработки фрезерованием. В таком случае имеет смысл и для первой группы поверхностей предусмотреть такой же маршрут.

При формировании вариантов маршрута обработки следует помнить, что нарушение монотонного повышения точности по мере последовательного выполнения его переходов нарушается термической обработкой, которая выполняется в середине маршрута. Это особенно важно для заготовки относительно небольшой жесткости. Кроме того, если заготовка подвергается частичной цементации, а рассматриваемая поверхность защищается от цементации припуском большей толщины, чем глубина цементации, то эта химико-термическая обработка делится на две операции: цементацию и закалку, между которыми необходимо предусмотреть переход для удаления этого припуска.

6.4.6. Синтез вариантов схем базирования

Каждому из выбранных на предыдущем этапе переходу (или группе переходов) должна соответствовать определенная схема базирования, которая, как это было указано в п. 4.1.1, должна в первую очередь обеспечить требуемую точность относительных поворотов (параллельность, перпендикулярность или угол поворота относительно системы координат станка), а только потом — заданную точность линейных размеров. Точность относительных поворотов обеспечивают установочная, направляющая и двойная направляющая базы (рис. 6.25). Обозначим связи, ограничивающие поворот относительно осей X , Y и Z , соответственно X_u , Y_u и Z_u , а расстояние между точками, обеспечивающими угловую ори-

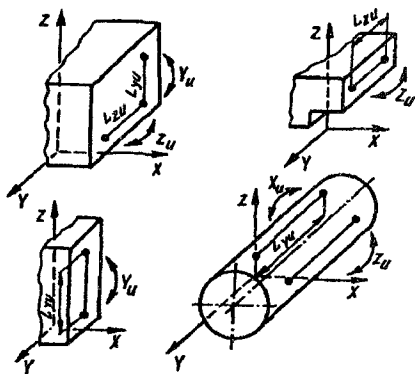


Рис. 6.25. Схемы связей относительных поворотов, налагаемых различными базами

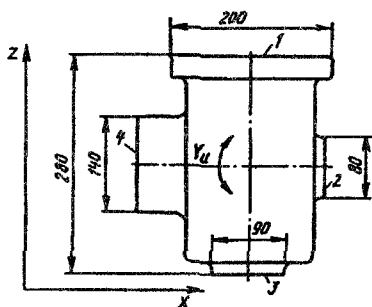


Рис. 6.26. Пример для расчета критической протяженности базы

$L_x = 200$ мм вдоль оси X и размер $L_z = 280$ мм вдоль оси Z . Для приближенной оценки критического расстояния (габаритного размера технологической базы) можно пользоваться следующей системой неравенств:

$$\left. \begin{aligned} L_{xu} &\geq 0,25(L_y + L_z); \\ L_{yu} &\geq 0,25(L_x + L_z); \\ L_{zu} &\geq 0,25(L_x + L_y). \end{aligned} \right\} \quad (6.6)$$

Тогда для случая, изображенного на рис. 6.26, $L_{yu} \geq 120$ мм. Следовательно, в соответствии с системой (6.6) для угловой ориентации заготовки относительно оси Y (Y_u) можно использовать только поверхности 1 и 4, так как их протяженность в нужном направлении превышает критическое значение. Поверхности 2 и 3 можно использовать лишь как опорные базы.

Но не одни размеры ограничивают возможность использования поверхностей в качестве технологических баз. К существенным ограничениям следует отнести прежде всего недоступность поверхности, т. е. принципиальную невозможность ее использования как базы для базирования выверкой или сопряжением. Другим ограничением является неудобное или неприемлемое расположение базы относительно обрабатываемой поверхности. Например, расположение базы и параллельной ей обрабатываемой поверхности с одной стороны заготовки затрудняет ее ориентацию при базировании сопряжением. Третьим ограничением является погрешность схемы базирования, которая не должна превышать одной четвертой допуска на соответствующий размер. Чтобы погрешность схемы базирования была равна нулю, необходимо совмещение конструкторской и технологической баз. Наиболее подходящие для технологических баз поверхности легко обнаружить с помощью графа размерных связей. Так, для обработки поверхностей 4, 5 и 8 (выдержать расстояние

ентацию, — L_{xu} , L_{yu} и L_{zu} . Эти расстояния ограничиваются соответствующими габаритными размерами технологических баз.

Достаточность габаритных размеров технологических баз определяется габаритными размерами детали в плоскости, перпендикулярной к оси угловой ориентации. Например, на рис. 6.26 размерами, определяющими ориентацию в направлении Y_u , являются габаритный размер

A_4 до оси поверхности 5) заготовки детали, изображенной на рис. 6.18,а, лучше всего использовать в качестве технологической базы поверхность 1. Если эту же поверхность использовать в качестве технологической базы для обработки поверхностей 7 отверстий диаметром d_3 , то возникает погрешность схемы базирования (смещение осей отверстий относительно окружности, центр которой должен совпадать с осью $O5$) для размера A_8 . Поэтому в качестве базы для обработки поверхностей 7 лучше (с точки зрения уменьшения погрешности схемы базирования) выбрать ось $O5$ поверхности 5.

Но может оказаться, что требуемый допуск намного превышает полученную погрешность схемы базирования. Тогда для создания возможности повышения уровня концентрации обработки в операции и снижения разнообразия технологической оснастки лучше принять в качестве базы для обработки всех поверхностей детали одну и ту же базу (поверхность 1). Такой подход к выбору технологической базы соответствует *принципу единства баз*, когда в качестве базы для обработки большинства или всех поверхностей заготовки детали принимается та поверхность, к которой на графе размерных связей подходит наибольшее число ребер (дуг).

Если у детали, кроме обработанных, имеются еще и исходные поверхности, то комплект баз для первой операции должен состоять из исходных поверхностей (исходные базы), причем установочную и двойную направляющую исходные базы можно использовать только один раз. Выбирая исходные технологические базы, преследуют одну из следующих целей: 1) обеспечить заданное чертежом относительное расположение обработанных и исходных поверхностей детали; 2) обеспечить равномерное распределение припуска на поверхности (обычно вспомогательной базе), обрабатываемой инструментом, жесткость системы крепления которого относительно невелика.

Первая цель может быть легко достигнута с помощью графа размерных связей. Это должна быть исходная поверхность, которая связана с обработанной. Для детали, изображенной на рис. 6.18,а, это будет поверхность 3 (см. исправленный граф на рис. 6.18,в). В таком случае погрешность схемы базирования для размера A_1 , который связывает группы исходных и обрабо-

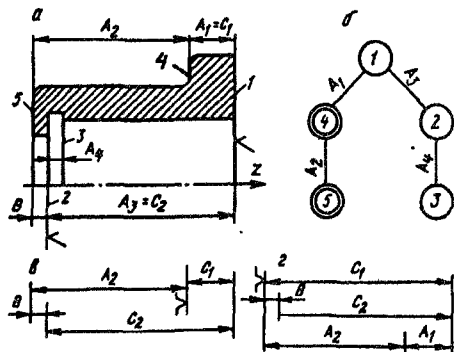


Рис. 6.27. Пример выбора базы для первой операции изготовления детали типа втулки

танных поверхностей, будет равна нулю. Однако в некоторых случаях приходится отступать от данного правила. Например, согласно графу (рис. 6.27,б) размерных связей детали, изображенной на рис. 6.27,а, базой для первой операции должна быть поверхность 4. Но на этой детали имеется элемент, размер B которого, во-первых, невелик, а во-вторых, не проставлен на чертеже. Поле рассеяния этого размера $\omega(B)$, согласно размерной цепи, изображенной на рис. 6.27,в, определяется выражением

$$\omega(B) = TA_2 + TC_1 + TC_2 ,$$

где TA_2 — допуск размера заготовки; TC_1, TC_2 — допуски технологических размеров.

Если точностью выполнения технологических размеров можно управлять, то точность размеров заготовки (расстояния между исходными поверхностями) задана заранее и не может быть изменена при механической обработке. Поэтому вполне вероятны ситуации, когда вследствие колебаний размера B указанный элемент детали не сможет выполнять свое служебное назначение либо вообще исчезнет (когда $\omega(B) \geq B$).

Если в качестве исходной базы принять поверхность 5, то, согласно размерной цепи, показанной на рис. 6.27,г, поле рассеяния размера B определяется выражением

$$\omega(B) = TC_1 + TC_2 .$$

Тогда за счет управления точностью выполнения размеров C_1 и C_2 можно удержать $\omega(B)$ в приемлемых пределах. Но при этом существенно увеличится поле рассеяния размера A_1 , т. е.

$$\omega(A_1) = TA_1 + TC_1 .$$

Для достижения второй цели (обеспечения равномерности распределения припуска) в качестве исходной базы принимается именно та поверхность, на которой толщина удаляемого слоя металла должна быть одинаковой (равномерной). Тогда даже при маложесткой технологической системе можно добиться заданной точности относительного расположения данной поверхности за меньшее число переходов (или проходов). Это высказывание доказывается следующим примером.

На рис. 6.28,а показана схема детали, у которой поверхность 2 расточена на горизонтально-расточном станке резцом в борштанге относительно небольшой жесткости. В данном случае A_i — размер детали, Z_i — размер заготовки. Известно, что чем больше смещение Δ оси отверстия заготовки относительно оси борштанги, установленной на заданный размер A_1 , тем больше будет смещение оси

расточенного отверстия (наследование погрешности заготовки).

На рис. 6.28,б изображены эскизы 1 и 2 операций обработки заготовки по первому варианту, когда исходной технологической базой была поверхность 3, и соответствующая технологическая размерная цепь. Согласно этой размерной цепи, поле рассеяния смещения Δ ($\omega_1(\Delta)$) можно определить из выражения

$$\omega_1\Delta = TZ_1 + TC_1 + TC_2,$$

где TC_2 — допуск настройки на размер $C_2 = A_1$. В данном случае поле рассеяния Δ будет достаточно большим, так как точность размера заготовки Z_1 нельзя повысить механической обработкой.

При реализации второго варианта обработки, когда исходной базой служила ось отверстия заготовки (рис. 6.28,в), поле рассеяния смещения Δ можно определить согласно соответствующей размерной цепи из следующего выражения:

$$\omega_2(\Delta) = TC_1 + TC_3,$$

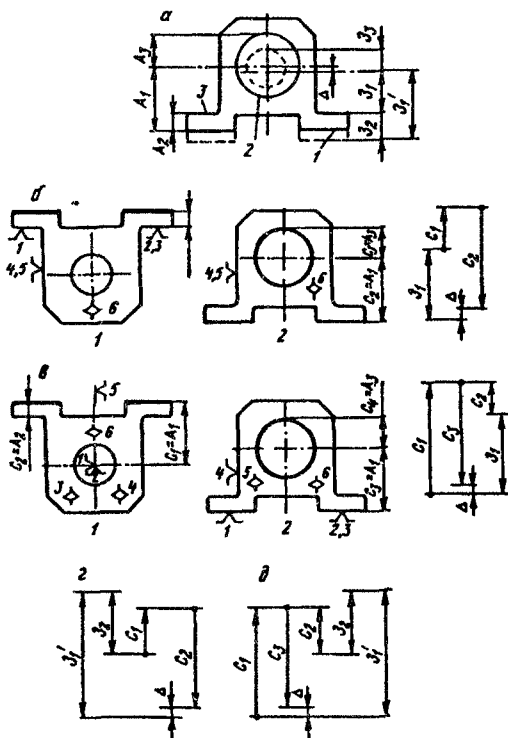


Рис. 6.28 Пример выбора базы для первой операции обработки заготовки корпусной детали

где TC_3 — допуск настройки на размер $C_3 = A_1$. Совершенно очевидно, что $\omega_2(\Delta) < \omega_1(\Delta)$. Следовательно, заданную точность размера A_1 можно обеспечить за меньшее число проходов (переходов), чем при первом варианте обработки. Однако при этом снижается точность размера $A_2(C_2)$. Действительно, согласно размерной цепи, приведенной на рис. 4,28,в,

$$\omega_2(A_2) = \omega_2(C_2) = TC_1 + TZ_1 .$$

Для первого варианта обработки $\omega_1(A_2) = \omega(C_1) < TA_2$. Очевидно, что $\omega_1(A_2) < \omega_2(A_2)$.

Погрешности $\omega_1(\Delta)$ и $\omega_2(A_2)$ существенно увеличиваются, если при неправильной простановке размеров заготовки (вместо размера Z'_1 проставлен размер Z_1 , см. рис. 6,28,а) увеличивается число звеньев технологической размерной цепи (рис. 6,28,з,д). В таком случае

$$\omega'_1(\Delta) = TZ'_1 + TZ_2 + TC_1 + TC_2 > \omega_1(\Delta); \quad \omega'_2(\Delta) = \omega_2(\Delta);$$

$$\omega'_2(A_2) = \omega_2(C_2) = TZ'_1 + TZ_2 + TC_1 > \omega_2(A_2) .$$

6.4.7. Синтез маршрута обработки заготовки

Первый шаг синтеза маршрута обработки заготовки — распределение отобранных переходов обработки типовых поверхностей заготовки по этапам типовой схемы изготовления деталей соответствующего класса (или подкласса). Типовая схема обработки является вариантом полного типового решения. Главный признак этапа типовой схемы — уровень точности, достигаемой по его завершении.

Как показывает практика, наращивание точности формы, размеров и относительного расположения поверхностей детали, повышение качества ее поверхностей должно осуществляться одновременно по всем основным элементам детали. Для этого сначала следует достигнуть одного уровня точности заготовки для основных поверхностей, затем начать их повторную обработку, стремясь к следующему уровню точности, и так до тех пор, пока не будут обеспечены точностные требования, заданные чертежом детали.

Причиной разделения технологического процесса изготовления детали на этапы служит необходимость включения внестаночных операций — химико-термической обработки и нанесения покрытий. В зависимости от целей и назначения внестаночных операций определяются их место в технологическом процессе и требования к обработке, предшествующей этим операциям.

Количество этапов и их содержание зависят от конструктивных особенностей той группы деталей, для которой разработана типовая схема изготовления. Это уровень жесткости, возможность базирования и закрепления заготовки без повреждения уже обработанных поверхностей, требования к уровню и виду внутренних остаточных напряжений (например, при изготовлении точных ходовых винтов необходимо назначать шесть термических операций: отжиг обычный и стабилизирующий, закалку и три стабилизирующих отпуска). Поскольку количество этапов зависит от точности заготовки, типовая схема обработки должна учитывать тип производства. В массовом производстве стремятся уменьшить количество этапов и, если это позволяют конструкция и требования к точности детали, совмещать в одной операции обработку поверхностей с существенно различными уровнями точности.

Табл. 6.12. Типовая схема обработки корпусных деталей

Номер этапа	Наименование этапа	Содержание этапа	Квалитет точности
Э0	Заготовительный	Изготовление, обрубка, очистка и отжиг заготовки	18...20
Э1	Предварительный	Обработка основных и вспомогательных баз, крупных плоскостей, удаление напусков	12...15
Э2	Термический	Старение искусственное	12...15
Э3	Малярный	Грунтование исходных поверхностей	—
Э4	Чистойой 1	Обработка основных и вспомогательных баз, плоскостей, фасок и канавок для выхода инструмента	10...12
Э5	Чистойой 2	Обработка крепежных отверстий, мелких плоских поверхностей, пазов	9...12
Э6	Отделочный	Окончательная обработка конструкторских баз	7...9
Э7	Малярный	Нанесение лакокрасочных покрытий	—

В табл. 6.12 дана в качестве примера типовая схема изготовления корпусных деталей, заготовки которых получены литьем. Аналогичные типовые схемы изготовления разработаны и для других классов (или подклассов) деталей. В табл. 6.12 для каждого этапа приводится только квалитет точности размеров, так как другие параметры качества обычно связаны с ней. Так, параметр шероховатости в зависимости от геометрической точности можно определить по формуле

$$Ra = K(IT),$$

где K — коэффициент, равный для нормальной геометрической точности 0,05, для повышенной — 0,025, для высокой — 0,012.

При нормальной геометрической точности допустимая погрешность формы составляет 0,3, при повышенной — 0,2, а при высокой — 0,12 допуска на соответствующий размер. Степень точности расположения (параллельность, соосность, перпендикулярность) связана с качеством точности следующим образом:

Квалитет точности	7	8	9	10	11	12	14
Степень точности расположения	6	7	8	9	10	11	12

Таким образом, распределение переходов по этапам типовой схемы обработки является первым шагом их упорядочения во времени. Кроме того, объект производства, полученный в результате реализации предыдущего этапа, является заготовкой для последующего.

При выборе порядка выполнения переходов внутри этапа нужно руководствоваться следующими рекомендациями.

1. Вначале обрабатываются поверхности комплекта технологических баз (в порядке уменьшения числа налагаемых связей), от которых будет выполняться большинство переходов этапа. Это поверхности, имеющие на графе размерных связей наибольшее число выходящих ребер, т. е. связанные с другими поверхностями наибольшим числом размеров.

2. Переходы обработки поверхностей, составляющих основной контур детали, выполняются раньше, чем переходы обработки поверхностей, представляющих собой уступы, пазы и т. д.

3. В заготовке детали, не являющейся телом вращения, перед обработкой отверстий должны быть обработаны плоскости.

4. Порядок обработки пересекающихся поверхностей устанавливается таким, чтобы уменьшить увод инструмента и вероятность его поломки, снизить дополнительные затраты на слесарную обработку (удаление заусенцев). На рис. 6.29 показаны некоторые часто

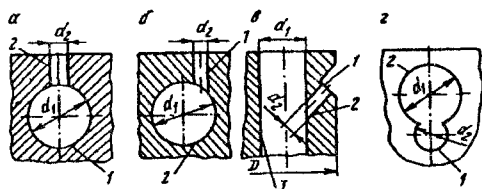


Рис. 6.29. Влияние относительного расположения отверстий на последовательность их обработки при $d_1 > d_2$

встречающиеся разновидности пересечения и расположения отверстий. Порядок обработки поверхностей соответствует присвоенным на рисунке номерам. Если оси отверстий пересекаются под прямым углом, то первым обрабатывается

отверстие большего диаметра d_1 (рис. 6.29,а). Если отверстия пересекаются под острым углом, скрещиваются или параллельны (рис. 6.29,б—г), то обработку начинают с отверстия меньшего диаметра, но перед сверлением углового отверстия диаметром d_2 необходимо обработать (создать) поверхность 1 (рис. 6.29,в), перпендикулярную к его оси, для предотвращения увода или поломки сверла.

5. На окончательном этапе поверхности обрабатываются в порядке, обратном их точности, т. е. чем точнее должна быть данная поверхность, тем позже она обрабатывается.

6. Порядок обработки поверхностей должен обеспечить наименьшее количество переустановок и минимум затрат времени на вспомогательные перемещения инструмента (или заготовки).

7. Порядок обработки поверхностей должен учитывать специальные требования к точности относительного расположения, если они указаны на чертеже или оговорены техническими требованиями. Необходимое относительное расположение может быть обеспечено прямым и косвенным путями. Прямое обеспечение заданных требований к расположению поверхностей может быть реализовано обработкой: от единой базы всех поверхностей, связанных указанными требованиями, за один установ (рис. 6.30,а); от единой базы за несколько установов (рис. 6.30,в); от разных баз при использовании одной из связанных требованиями точности относительного расположения поверхностей в качестве базы (рис. 6.30,б).

В случае, показанном на рис. 6.30,б, при обработке поверхности 1 в качестве базы применяется предварительно обработанное раз-

вертыванием отверстие 2. А в случае, показанном на рис. 6.30,в, невозможность обработки на горизонтально-расточном станке за один установ нескольких отверстий, параллельных базе А, и одного, перпендикулярного к ней, вынуждает вести обработку последнего либо на другом станке, либо с установкой в другом приспособлении.

Косвенное обеспечение точности относительного расположения нескольких поверхно-

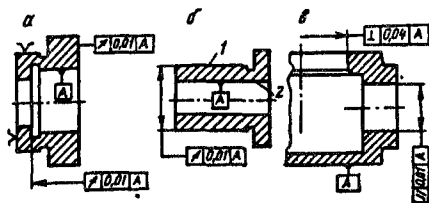


Рис. 6.30. Влияние требований к точности расположения на последовательность выполнения переходов

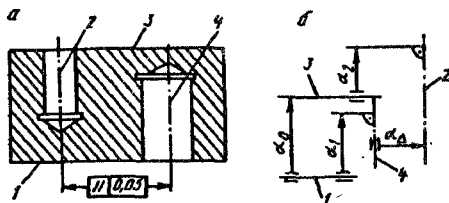


Рис. 6.31. Схема косвенного обеспечения точности относительного расположения осей отверстий

стей может быть реализовано обработкой от разных баз только в том случае, если заранее обеспечены еще более высокие требования к точности относительного расположения этих баз (рис. 6.31,а). В указанном случае заданная параллельность является замыкающим звеном α_{Δ} четырехзвенной цепи α_i относительных поворотов базовых поверхностей 1, 3 заготовки и осей 2, 4 обрабатываемых отверстий (рис. 6.31,б). Из сказанного следует, что косвенный метод дает самую низкую точность относительного расположения поверхностей деталей.

Максимальная точность относительного расположения поверхностей обеспечивается при их обработке за один установ. Однако решение задачи обеспечения достаточно высокой соосности наружной и внутренней поверхностей втулки, которая обрабатывается за один установ на токарно-револьверном станке, невозможно, если не ввести перед переходом «развертывание», обеспечивающим заданную точность размера отверстия, переход «растачивание» (вместо зенкерования). Дело в том, что зенкер и развертка имеют малую поперечную жесткость и поэтому почти не исправляют смещение и искривление оси отверстия, полученные при сверлении.

6.4.8. Синтез структуры операции

Окончательный вариант последовательности обработки, временной структуры, используемого оборудования и оснастки выбирается на стадии формирования операций. Как было показано в § 5.6, эффективность обработки повышается при концентрации переходов и заготовок в операции, при использовании многопозиционного оборудования с выделенной зоной загрузки. Однако на выбор временной структуры операции, вида оборудования и оснастки существенно влияет тип производства (см. табл. 6.4).

Чтобы решить поставленную для данной процедуры задачу в условиях подготовки серийного производства, необходима информация об имеющемся оборудовании или, в крайнем случае, о возможности его приобретения, т. е. необходим массив, содержащий следующие сведения: модель станка, размеры рабочей зоны, технологические возможности (набор выполняемых на станке переходов), перечень наименований вспомогательного инструмента.

Первым шагом решения данной задачи будет распределение переходов каждого этапа по станкам, для чего переходы сопоставляются с технологическими возможностями станков, а габариты детали — с габаритами его рабочего пространства. При этом может оказаться, что один и тот же переход можно выполнять на разных станках. На рис. 6.32 показан алгоритм распределения переходов

по типоразмерам станков, где i — номер перехода, $N_{\text{прх}}$ — количество разных переходов в этапе, j — номер станка в массиве, q — номер отобранного станка, $N_{\text{ст}}$ — количество станков в массиве.

Характеристика очередного (i -го) перехода (это может быть его код) формируется в блоке 2 для сравнения с технологическими возможностями j -го станка (блок 4). Если в массиве переходов j -го станка есть соответствующий переход (блок 5) и данный станок уже ранее был отобран для другого перехода (блок 8), то в таблице выбора (табл. 6.13) делается отметка, т. е. представляется единица (блок 10) и рассматривается следующий переход (блоки 11 и 12). Если j -й станок ранее не отбирался (блок 8), то ему присваивается очередной номер q , который заносится в табл. 6.13.

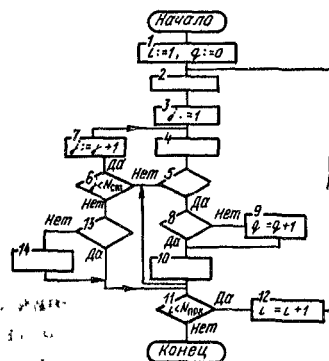


Рис. 6.32. Структурная схема алгоритма распределения переходов этапа по типоразмерам технологического оборудования

Табл. 6.13. Таблица выбора оборудования (фрагмент)

Номер перехода i	Номер станка q						
	1	2	3	4	5	6	...
1	1	1	1	0	0	0	...
2	1	0	0	0	1	0	...
3	1	1	0	0	0	0	...
4	0	0	1	1	0	0	...
5	1	0	1	0	1	0	...
6	0	0	0	1	0	1	...
7	1	0	0	1	0	0	...
8	0	0	0	1	0	0	...
...

Так, для i -го перехода рассматриваются все станки из массива (блоки 5...7). Если для выполнения данного перехода нет соответствующего технологического оборудования (блок 13), то этот переход записывается в отдельный список (блок 14) для принятия одного

из следующих решений: приобретение необходимого оборудования, модернизация одного из имеющихся станков для расширения его технологических возможностей, замена данного перехода другими. Однако блоки 13 и 14 не потребуются, если массив, из которого отбираются переходы во время выполнения синтеза вариантов маршрута обработки типовых поверхностей детали (см. например, табл. 6.10), будет согласован с массивом переходов, которые можно реализовать на имеющемся оборудовании.

Анализ таблицы выбора позволяет отобрать минимальную номенклатуру технологического оборудования, необходимого для выполнения всех переходов рассматриваемого этапа. Так, согласно табл. 6.13, для выполнения восьми переходов достаточно двух станков: первого ($q = 1$) и четвертого ($q = 4$), если можно выполнить переход 5 перед переходом 4. Тогда на первом станке будут выполняться переходы 1...3 и 5, а на четвертом — 4, 6...8. Если же нельзя осуществить переход 5 перед переходом 4, то для выполнения данных восьми переходов потребуются три станка: первый, третий и четвертый.

Следующим шагом синтеза операций будет анализ возможности совмещения переходов, отобранных для данного типоразмера станка. Этот анализ ограничивается как технологическими характеристиками станка, так и конструкцией детали. Например, в станке с револьверной головкой не хватает гнезд для размещения всех инструментов, необходимых для выполнения заданного числа переходов. Или среди отобранных станков есть такие (например, круглошлифовальные), которые не позволяют (обычно это неэффективно для серийного производства) совмещать шлифование нескольких шеек разного диаметра.

С другой стороны, отобранные для данного станка переходы не могут, например, быть выполнены при использовании одного комплекта баз или за один установ. В таких случаях принимается одно из следующих альтернативных решений: уменьшить число переходов в операции вплоть до одного (таким образом увеличивается число операций, выполняемых на одном и том же станке); выполнить операции за несколько последовательных установов в одной рабочей зоне; выполнить операции путем совмещения в одной рабочей зоне нескольких (1...4) рабочих позиций (рис. 6.33); применить комбинированный инструмент. При совмещении на одном столе нескольких рабочих позиций

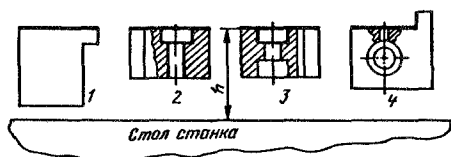


Рис. 6.33. Схема совмещения четырех рабочих позиций на столе многоцелевого станка с ЧПУ

в операции переставляется во вто-

рую и т.д. С последней позиции снимается заготовка, полностью прошедшая операцию. Желательно так базировать заготовки в каждой позиции, чтобы уменьшить количество необходимых для их обработки вспомогательных движений. Так, например, ориентированы заготовки на рис. 6.33. Для фрезерования четырех плоскостей достаточно позиционировать фрезу один раз (на расстоянии h от стола).

Таким образом, после рассмотрения всех ранее отобранных вариантов маршрута обработки заготовки будет получено несколько связанных между собой вариантов структур операций. Окончательный выбор варианта последовательности обработки, содержания и структур входящих в технологический процесс операций можно осуществить на основе результатов технико-экономических расчетов, которые выполняются в десятой процедуре индивидуального проектирования.

6.4.9. Назначение допусков на технологические размеры

Установление целесообразных допусков на технологические размеры имеет важное значение, так как оказывает существенное влияние на качество технологического процесса и затраты на изготовление детали. Если чертежный размер A_i выполняется непосредственно на какой-либо операции технологического процесса при совпадении технологической и конструкторской баз, то допуск на соответствующий технологический размер C_i определяется просто: $TC_i \leq TA_i$.

Но обычно один или несколько чертежных размеров детали непосредственно не выполняют, а получают в результате выполнения других размеров, которые связаны с чертежными через размерные цепи. В таких случаях допуск на технологический размер устанавливается в соответствии со статистической (экономической) точностью выполнения рассматриваемой операции (ωC_i) и некоторыми дополнительными соображениями. Таблицы для определения экономической точности, часть которых для каждого метода и способа обработки приведена гл. 2, составлены на основании сбора статистических данных в производственных условиях. При составлении этих таблиц анализировались сведения только о тех операциях, при выполнении которых технологические и конструкторские базы совпадали (погрешность схемы базирования равна нулю), а погрешностями формы и относительного расположения технологической и измерительной баз можно было пренебречь. Таким образом, ωC_i учитывает те компоненты, источниками которых являются геометрические погрешности (станка, инструмента и приспособления), кинематические погрешности станка, копирование погрешности за-

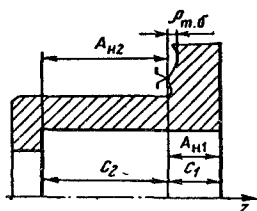


Рис. 6.34. Схема размерной настройки (C_1 , C_2 и A_{H1} , A_{H2} — соответственно технологические и настроенные размеры)

$$TC_i = \omega C_i + \rho_{т.б},$$

где $\rho_{т.б}$ — погрешность формы и относительного расположения технологической базы (пространственные отклонения).

Пространственные отклонения технологической базы принимаются во внимание в тех случаях, когда технологическая база является исходной или предварительно (грубо) обработанной поверхностью. В зависимости от уровня геометрической точности пространственные отклонения составляют следующую часть допуска на линейный размер:

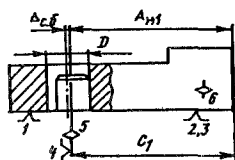
Относительная геометрическая точность	Нормальная (А)	Повышенная (В)	Высокая (С)
Пространственные отклонения, % от допуска на размер	60	40	25

Если скрытая технологическая база (ось отверстия) реализуется за счет цилиндрического пальца, то возникает неопределенность базирования (рис. 6.35). В таких случаях

$$TC_i = \omega C_i + TD + \Delta S,$$

где TD — допуск диаметра базирующего отверстия; ΔS — верхнее отклонение диаметра базирующего пальца. Сумма этих компонентов (TD и ΔS) составляет погрешность схемы базирования ($\Delta_{с.б}$).

Рис. 6.35. Схема размерной настройки с неопределенностью базирования



Аналогично следует поступать в случаях, когда схема базирования реализуется с помощью призмы (рис. 6.36):

$$TC_i = \omega C_i + \Delta_{с.б}.$$

Когда заготовка обрабатывается блоком инструментов (рис. 6.37),

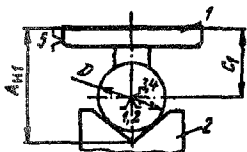


Рис. 6.36. Схема размерной настройки с погрешностью схемы базирования:
1 — заготовка; 2 — призма

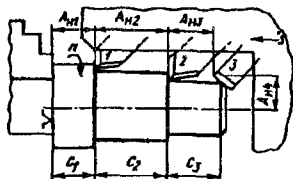


Рис. 6.37. Схема размерной настройки блока инструментов (C_i, A_{H_i} — выполняемые и настроечные размеры)

то только один из них, базовый (предположим, 1), настраивается относительно технологической базы (т. е. соответствующего установочного элемента приспособления). Остальные настраиваются относительно базового инструмента 1. Поэтому:

$$TC_1 = \omega C_1; \quad TC_2 = \omega A_{H2}; \quad TC_3 = \sqrt{(\omega A_{H3})^2 + (\omega A_{H4})^2}.$$

При обработке поверхности вращения размерная настройка осуществляется относительно ее оси (рис. 6.38). В таких случаях пространственные отклонения технологической базы (реальной) влияют на точность размера только через копирование погрешности заготовки, что учитывается в значении ωC_i . Поэтому $TC_i = \omega C_i$.

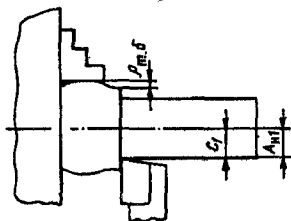


Рис. 6.38. Схема размерной настройки при обработке поверхности вращения

6.4.10. Определение минимальных припусков

В процессе размерного анализа проектируемых технологических процессов следует различать напуски и припуски на обработку, так как припуски участвуют в формировании размерных связей, а напуски не участвуют.

Напуском принято называть ту часть материала заготовки, необходимость удаления которой при последующей механической обработке вызвана упрощением формы заготовки по отношению к форме готовой детали (см. рис. 6.21). *Припуском* называют ту часть удаляемого материала, наличие которого на заготовке вызвано необходимостью обеспечения заданных требований к точности и качеству поверхности в результате обработки резанием или другим методом со снятием слоя материала. В тех местах заготовки, где удаляемый материал выступает в роли припуска, номинальная форма поверхности заготовки, как правило, совпадает с заданной но-

минальной поверхности готовой детали. В этом случае припуск рассматривают как слой материала и оценивают расстоянием между соответствующими поверхностями.

— Различают операционные и общий припуски. *Операционный (переходный) припуск* определяется разностью технологических размеров, полученных на смежных операциях (переходах). *Общий припуск* является суммой операционных припусков на данной поверхности. Различают также номинальный и минимальный операционные припуски. Составляющими *минимального операционного припуска* в общем случае будут: Rz_{i-1} — высота микронеровностей, полученная на предшествующей стадии обработки (операции или переходе); H_{i-1} — удаляемый дефектный подповерхностный слой материала, полученный на предшествующей стадии обработки; ρ_{i-1} — пространственные отклонения (сумма) обрабатываемой поверхности, не входящие в допуск на выполняемый размер; ε_i — погрешность установки на рассматриваемой стадии обработки, не входящая в допуск на выполняемый размер. *Номинальный операционный припуск* равен разности между номинальными значениями технологических размеров, полученных на смежных операциях (переходах), т. е. $z_i = |C_{i-1} - C_i|$.

Все сказанное выше о припуске относится к припуску на сторону (*одностороннему припуску*). При обработке поверхностей вращения

допуски задаются на диаметр, поэтому и припуск принято задавать на диаметр (т. е. удваивать односторонний). Аналогично может быть задан припуск на ширину паза, выполняемого мерным инструментом.

На рис. 6.39 показана схема односторонних припусков для случая обработки одной поверхности от одной базы. Тогда

$$z_i = C_{i-1} - C_i = z_{\min i} + TC_{i-1},$$

где $z_{\min i}$ — минимальный припуск на i -й переход; TC_{i-1} — допуск на технологический размер, выполняемый на $(i - 1)$ -м переходе.

Данное выражение является верным для всех i , кроме $i - 1$, так как в литых или кованных заготовках допуск на размеры является симметричным ($\pm TC_0/2$). В этом случае

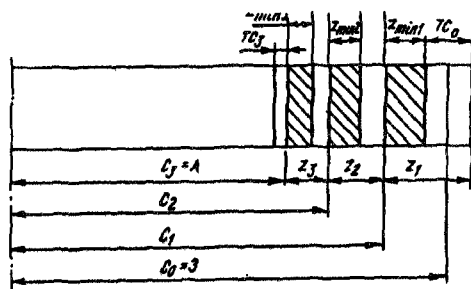


Рис. 6.39. Схема определения припусков при одной поверхности от одной базы. Тогда

$$z_1 = C_0 + TC_0 / 2 - C_1 = z_{\min 1} + TC_0.$$

На рис. 6.40,а показана схема определения припусков при обработке двух параллельных поверхностей с последовательной сменой баз и полным удалением поверхностей заготовки. В этом случае для поверхности 1

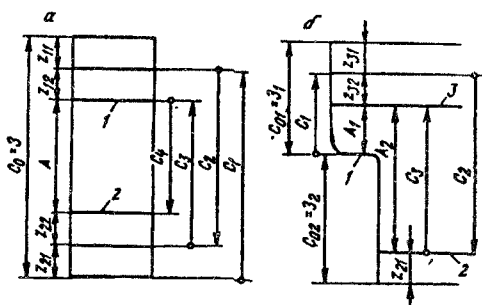


Рис. 6.40. Схемы определения припусков при обработке нескольких поверхностей со сменой баз

$$z_{11} = C_0 + TC_0 / 2 - C_1; \quad z_{12} = C_2 - C_3,$$

а для поверхности 2

$$z_{21} = C_1 - C_2; \quad z_{22} = C_3 - C_4$$

(z_{11} — припуск, удаляемый на первой операции).

На рис. 6.40,б показана схема определения припусков при обработке двух параллельных плоскостей (2 и 3), когда базой на первой операции является исходная поверхность 1. Тогда:

$$z_{31} = C_{01} + TC_{01} / 2 - C_1;$$

$$z_{21} = C_{02} + TC_{02} / 2 + C_1 - C_2; \quad z_{32} = C_1 - C_3.$$

Приведенный пример показывает, что номинальный припуск может быть результатом решения размерной цепи, содержащей более трех звеньев.

Компоненты минимального припуска $z_{\min i}$ не всегда полностью включаются в его состав. Так, при обработке заготовок из чугуна и цветных сплавов компонент H (дефектный слой) включается только при определении припуска на первую обработку литой поверхности. При последующих операциях этот компонент может не учитываться. Не включаются в минимальный припуск и пространственные отклонения, если они не могут быть устранены выполняемым переходом. Например, при разворачивании плавающей разверткой и свободном протягивании смещение и увод оси отверстия практически не устраняются.

Для размерного анализа рационально разделить минимальный припуск на две части:

$$z_{\min i} = z_{ai} + z_{bi},$$

где $z_{ai} = (Rz + H)_{i-1}$; $z_{bi} = \rho_{i-1} + \varepsilon_i$. Значение z_{ai} всегда является компонентом минимального припуска $z_{\min i}$, включаемого в размерную цепь. Компонент ρ_{i-1} включается в минимальный припуск только как искривление оси или ее непараллельность (неперпендикулярность) относительно базы (рис. 6.41). В зависимости от схемы базирования пространственное отклонение ρ определяется так:

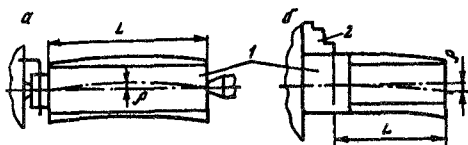


Рис. 6.41. Схемы влияния кривизны ρ заготовки на минимальный припуск

так:

для установки в центрах

$$\rho = \Delta_{кр} L;$$

для установки в патроне

$$\rho = 2\Delta_{кр} L,$$

где $\Delta_{кр}$ — местная кривизна, мкм/мм; L — длина заготовки 1 (рис. 6.41, а) или ее обрабатываемого конца, выступающего из приспособления 2 (рис. 6.41, б). Значение $\Delta_{кр}$ приводится в таблицах и зависит от габаритных размеров заготовки, метода ее получения и вида механической обработки.

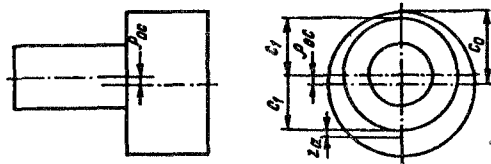


Рис. 6.42. Схема определения припуска при смещении осей

Другие виды пространственных отклонений, в том числе смещения $\rho_{ос}$ осей частей заготовки, не включаются в $z_{\min i}$. Согласно схеме, приведенной на рис. 6.42,

$$C_0 = C_1 + z_a + \rho_{ос}.$$

Но $\rho_{ос}$ заготовки при размерном анализе является самостоятельным звеном размерной цепи, поэтому следует принимать $z_{\min} = z_a$. Аналогичная ситуация возникает и с погрешностью установки ε_i , так как все ее элементы входят в допуск, кроме погрешности схемы базирования, которая также выявляется при решении размерной цепи.

6.4.11. Размерные схемы и размерные цепи технологического процесса

Следующий этап размерного анализа — построение размерной схемы технологического процесса. Методику выполнения данного этапа поясним примером. На рис. 6.43 показаны схемы детали и ее заготовки с размерами, проставленными по одной оси (Z), а на рис. 6.44 — схемы операционных эскизов с технологическими размерами, проставленными по той же оси. Операцией 020 является старение.

Размерная схема представляет собой технологический документ, в котором графически отражено изменение состояния заготовки на каждой операции ее обработки. Она должна строиться для всех трех осей (проекций), а при необходимости — и для отдельных сечений.

На рис. 6.45 приведена размерная схема технологического процесса обработки заготовки, изображенной на рис. 6.43, б, по оси Z .

На размерной схеме отражены все поверхности, образующиеся в процессе обработки от заготовки до готовой детали. Так, поверхность 3 в детали возникает после двукратной обработки основания (операции 005 и 025) с удалением припусков z_1 и z_2 , что ведет к исчезновению поверхностей 1 и 2. Аналогично возникает поверхность 7 отверстия. Однако при каждой обработке вследствие неизбежного смещения возникает новая ось. В данном случае оси также считаются условными поверхностями. Ось 12 отверстия заготовки 9 после удаления припуска z_3 исчезает, и возникает ось 11 промежуточного состояния отверстия 8. Все поверхности объекта обработки нумеруются в том порядке, в котором они расположены на схеме детали (в данном случае номерами 1...14).

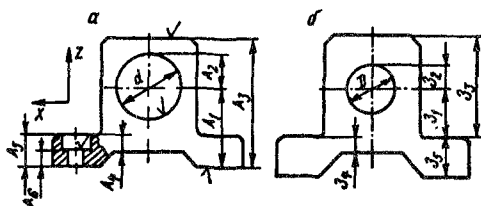


Рис. 6.43. Схемы детали (а) и заготовки (б)

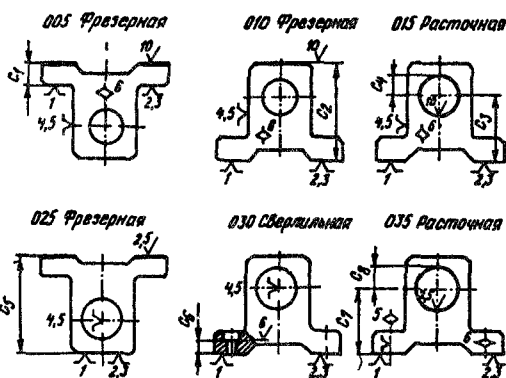


Рис. 6.44. Схемы операционных эскизов технологического процесса обработки заготовки, показанной на рис. 6.43, б

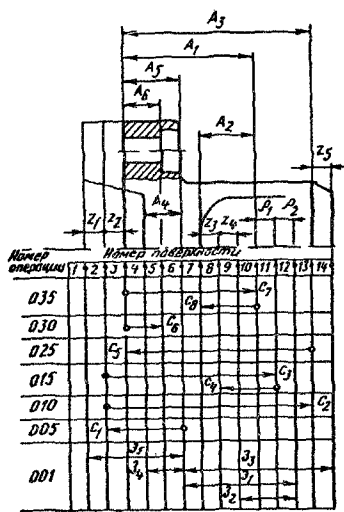


Рис 6.45 Размерная схема технологического процесса обработки заготовки, показанной на рис 6.43, б

технологические размеры, совокупность которых приведет к поверхности б. Так, размеры C_7 и C_8 не позволяют решить поставленную задачу, а C_5 , C_2 и C_1 дают возможность это сделать.

Выделение размерных цепей с помощью размерной схемы — относительно несложная задача, если в них имеются два или три звена. Но для более длинных цепей задача существенно усложняется. Кроме того, эта операция недостаточно формализована для выполнения на ЭВМ и контроля возможных ошибок. С этой точки зрения более подходящим методом будет выделение размерных цепей с помощью графа технологического процесса.

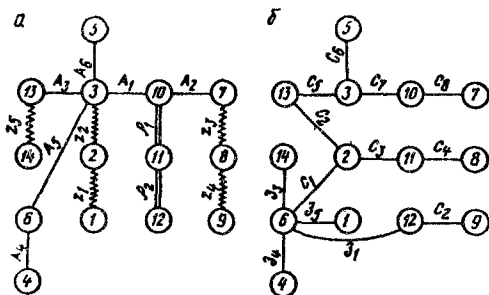
На рис. 6.46 даны исходный и производный графы размерных связей технологического процесса изготовления детали, показанной на рис. 6.43, а. Исходный граф связывает поверхности замыкающими звеньями, а производный граф — технологическими размерами. Эти графы позволяют формализованно контролировать правильность постановки размеров в соответствии с требованиями, сформулированными для графа размерных связей в п. 6.4.1.

Замкнутые контуры (размерные цепи) выделяются посредством производного графа. Для этого отмечаем на нем номера поверхностей, связанных замыкающим звеном, после чего легко находим кратчайший путь, соединяющий на графе отмеченные поверхности.

Технологические размеры C_i на размерной схеме являются векторными величинами и откладываются от соответствующих технологических баз (обозначены кружочками). Размеры заготовки (z_i) и детали (A_i), припуски (z_i) и смещения (ρ_i) осей считаются симметричными величинами и откладываются без выбора одного из направлений.

Размерная схема позволяет выделять технологические размерные цепи, где замыкающими звеньями будут размеры детали A_i , припуски z_i и смещения ρ_i . В одну размерную цепь может входить только одно замыкающее звено. Для выделения размерной цепи выбирается замыкающее звено, например A_5 . Оно соединяет поверхности 3 и б. Начиная с поверхности 3, ищем связанные

Рис 6.46. Исходный (а) и производный (б) графы технологического процесса изготовления детали, показанной на рис. 6.43, а



Например, если замыкающее звено ρ_1 связывает поверхности 10 и 11, то кратчайшим путем, соединяющим их на производном графе, является цепочка из звеньев $C_7-C_5-C_2-C_3$. Кратчайший путь всегда будет единственно возможным. Он позволяет записать уравнение размерной цепи без ее построения по следующим правилам: 1) в левой части уравнения записывается замыкающее звено со знаком «+»; 2) обход размерной цепи начинается с той из поверхностей, связанных замыкающим звеном, у которой меньший номер, в направлении отхода от замыкающего звена; 3) по мере обхода в правой части уравнения составляющие звенья записываются со знаком «+», если переход через данное звено идет от поверхности с меньшим номером к поверхности с большим номером, и со знаком «-», если переход идет от поверхности с большим номером к поверхности с меньшим номером.

Для звена ρ_1 уравнение размерной цепи будет иметь вид $\rho_1 = -C_7 + C_5 - C_2 + C_3$.

6.4.12. Методика расчета по уравнениям размерных цепей

Полученные уравнения размерных цепей следует переписать в таком порядке, чтобы в каждом уравнении было только одно неизвестное (остальные определены ранее). Для рассмотренного в п. 6.4.11 примера этот порядок будет следующим:

$$\left. \begin{aligned}
 &1) A_1 = C_7; \quad 2) A_2 = C_8; \quad 3) A_3 = C_5; \\
 &4) A_4 = z_4; \quad 5) A_6 = C_6; \\
 &6) z_2 = C_2 - C_5; \\
 &7) A_5 = C_5 - C_2 + C_1; \quad 8) z_1 = z_5 - C_1; \\
 &9) \rho_2 = -C_3 + C_1 + z_1; \quad 10) z_5 = -C_2 + C_1 + z_4; \\
 &11) \rho_1 = -C_7 + C_5 - C_2 + C_3; \\
 &12) z_3 = C_8 - C_7 + C_5 - C_2 + C_3 - C_4; \\
 &13) z_4 = C_4 - C_3 + C_1 + z_1 - z_2.
 \end{aligned} \right\} (6.7)$$

Если замыкающим звеном технологической размерной цепи является невыполняемый непосредственно чертежный размер, для которого известны номинальное значение A_i , допуск TA_i и верхнее (или нижнее) отклонение ΔS_i , то расчет заключается в следующем.

Шаг 1. Определение запаса по допуску TA_i , для чего вычисляется поле рассеяния замыкающего звена A_i :

$$\omega A_i = \sum TC_j; \quad \omega A_i = 0,3333t(\alpha) \sqrt{\sum (TC_j^2)}$$

(вычисления ведутся по первой формуле, если число звеньев размерной цепи меньше или равно четырем, и по второй во всех остальных случаях). Здесь $t(\alpha)$ — коэффициент, зависящий от выбранного процента риска. Полагая, что $\alpha = 0,27\%$, а закон распределения погрешностей технологических размеров нормальный, принимаем $t(\alpha) = 3$.

Технологический процесс спроектирован правильно, если соблюдается неравенство $TA_i > \omega A_i$, т. е. имеется некоторый запас $\Delta \omega_i$ по допуску на чертежный размер, определяемый выражением

$$\Delta \omega_i = TA_i - \omega A_i.$$

Дефицит по точности замыкающего звена (т. е. $\Delta \omega_i < 0$) является признаком неизбежности выхода части деталей в брак. В таком случае необходимо выбранные ранее допуски технологических размеров (TC_j) уменьшить, предусмотрев для этого повышение точности отдельных операций за счет смены оборудования, применения более совершенных приспособлений, инструмента и средств активного контроля. Если это по каким-либо причинам невозможно, то необходима корректировка технологического процесса, которая заключается: 1) в выборе других баз и иной, по сравнению с имеющейся, постановкой размеров на операциях, что может обеспечить укорочение размерной цепи; 2) во введении промежуточного перехода (или переходов), который позволит повысить точность каких-либо составляющих звеньев.

Запас по точности замыкающего звена рационально распределить симметрично по отношению к среднему его значению $A_{i\text{cp}}$, т. е. принять для охватываемого размера

$$A_{i\text{cp}} = A_i - \Delta S_i - TA_i / 2,$$

а для охватываемого

$$A_{i\text{cp}} = A_i + \Delta I_i + TA_i / 2,$$

где ΔT_i — нижнее отклонение размера A_i .

Шаг 2. Определение неизвестного технологического размера (C_0) осуществляется в два этапа. Сначала определяется его среднее значение $C_{0\text{ ср}}$ из следующего выражения:

$$C_{0\text{ ср}} = A_{i\text{ ср}} - \sum C_{j\text{ ср}},$$

где $C_{j\text{ ср}}$ — среднее значение j -го звена (определенное из размерных цепей заранее), а затем — номинальное по выражению

$$C_0 = C_{0\text{ ср}} + TC_0/2$$

для охватывающего размера или

$$C_0 = C_{0\text{ ср}} - TC_0/2$$

для охватываемого.

Полученное значение C_0 целесообразно округлить, согласуя число десятичных разрядов после запятой с точностью данного размера. Чтобы округление не привело к появлению дефицита точности, необходимо соблюдать следующее неравенство:

$$K_{\text{окр}} \leq \Delta\omega_i/2,$$

где $K_{\text{окр}}$ — максимальная величина коррекции C_0 при округлении; $\Delta\omega_i$ — запас по допуску на замыкающее звено.

Если рассматривается двухзвенная размерная цепь, замыкающим звеном которой служит чертежный размер A_i , то:

$$C_j = A_i; TC_j = TA_i - \Delta\omega_i; \Delta S_j = \Delta S_i; C_{j\text{ ср}} = A_{i\text{ ср}},$$

где $\Delta\omega_i$ — назначаемый запас допуска, необходимый для округления $C_{j\text{ ср}}$ и составляющий 5...10% TA_i .

Если замыкающим звеном является припуск, то заранее известно его минимальное значение $z_{\text{мин}i}$. В таком случае уравнение размерных цепей переписывают следующим образом:

$$z_{\text{мин}} = \sum C_{j\text{ мин}} - \sum C_{j\text{ макс}}.$$

Например, уравнения 12 и 6 из системы (6.7) будут иметь вид:

$$z_{\text{мин}3} = (C_8 + C_5 + C_3)_{\text{мин}} - (C_7 + C_2 + C_4)_{\text{макс}};$$

$$z_{\text{мин}2} = C_{2\text{мин}} - C_{5\text{макс}}.$$

Из приведенных уравнений можно определить максимальное или минимальное значение искомого звена, например:

$$C_{4\text{макс}} = (C_7 + C_2)_{\text{макс}} + z_{\text{мин}3} - (C_8 + C_5 + C_3)_{\text{мин}}.$$

Так как допуски TC_4 и TC_2 известны заранее, можно определить номинальные и средние значения размеров C_4 и C_2 . Эти значения округляются с учетом выбранного для них запаса по допуску. Поскольку C_4 — охватывающий размер, то его номинальное значение равно округленному значению $C_{4\max}$. Аналогично для охватываемого размера C_2 номинал равен $C_{2\min}$.

Если замыкающим звеном является смещение оси отверстия в результате его обработки, то следует учитывать, что среднее значение этого параметра принимается равным нулю. Поэтому из таких уравнений можно найти искомое среднее значение технологического размера. Например, из уравнения 11 системы (6.7) находим

$$C_{3\text{ср}} = C_{7\text{ср}} + C_{2\text{ср}} - C_{5\text{ср}}.$$

А допуск на смещение ρ_i находим из выражения

$$T\rho_i = \sum TC_j \quad \text{или} \quad T\rho_i = \sqrt{\sum (TC_j)^2},$$

в зависимости от числа звеньев в размерной цепи.

В реальных технологических процессах расчет размерных цепей иногда может иметь особенности, например при обработке с заданным припуском или если технологической базой является обрабатываемая поверхность. Первый случай имеет место, когда в конструкции машины используются детали с относительно широким допуском на размер и жесткими требованиями к точности формы и микрогеометрии обработанной поверхности. При изготовлении таких деталей в качестве отдельных операций применяют полирование, хонингование, суперфиниширование или доводку. Так как значение припуска в таких случаях довольно жестко регламентируется вследствие резкого снижения производительности с увеличением припуска, то для расчета технологических размеров припуск можно принимать за составляющее звено, а окончательный технологический размер — за замыкающее.

На рис. 6.47 показаны схемы обработки поверхностей 3, 3', которые с помощью отводимых упоров 1, контактирующих с исходной поверхностью 2, используются как техно-

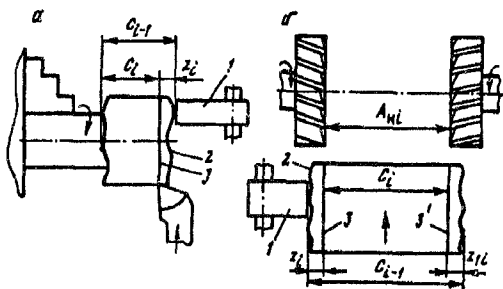


Рис. 6.47. Схемы обработки при базировании по исчезающим технологическим базам

логические базы на рассматриваемой операции. Припуск z_i примерно равен расстоянию между упором и режущими кромками инструмента. При таком способе обработки z_i перестает зависеть от технологических размеров и приобретает значение составляющего звена. Его минимальное значение принимается согласно формуле $z_{\min i} = (Rz + H + \rho)_{i-1}$, а допуск припуска Tz_i — согласно экономической точности выполняемой операции.

При односторонней обработке (рис. 6.47, а) поле рассеяния ωC_i определяется по формуле $\omega C_i = Tz_i + TC_{i-1}$. А при двусторонней обработке (рис. 6.47, б) замыкающим звеном будет припуск z_{1i} , который можно найти по зависимости $z_{1i} = C_{i-1} - C_i - z_i$. При этом поле рассеяния $\omega z_{1i} = TC_{i-1} + TC_i + Tz_i$.

6.4.13. Методика выполнения завершающих процедур

Методы оптимизации режимов резания для элементарного, инструментального и блочных переходов рассмотрены в гл. 5. Нормирование операций заключается в определении штучного времени согласно выражениям (1.2)...(1.7). Основное время определяется в результате оптимизации, методика которой зависит от вида перехода. Элементы вспомогательного и подготовительно-заключительного времени приведены в справочниках.

Критерием эффективности спроектированного технологического процесса будет сумма затрат $Z_{\text{общ}}$ по всем операциям:

$$Z_{\text{общ}} = \sum_{i=1}^e Z_i,$$

где e — количество операций; Z_i определяется согласно выражению (5.8). Входящие в это выражение затраты в минуту на эксплуатацию рабочего места E определяются по формуле

$$E = E_{\text{ст}} + E_{\text{опер}},$$

где $E_{\text{ст}}$ — затраты на эксплуатацию станка; $E_{\text{опер}}$ — затраты на оплату работы оператора:

$$E_{\text{ст}} = 0,877E_{\text{сб}}K(1 + \alpha(1 - \eta_{\text{затр}})/\eta_{\text{затр}});$$

$$E_{\text{опер}} = \xi E_{\text{тар}}K_{\text{нал}}\gamma.$$

Здесь $E_{\text{сб}}$ — практические затраты на базовом рабочем месте, зависящие от типа производства; K — коэффициент, показывающий, во сколько раз затраты на эксплуатацию данного станка больше,

чем на эксплуатацию базового; α — коэффициент; $\eta_{затр}$ — удельный вес постоянных затрат в затратах на рабочем месте; $\eta_{заг}$ — коэффициент загрузки станка; ξ — коэффициент, равный 2,66 и учитывающий различные виды доплат (за переработку норм, премию, дополнительную зарплату и т. д.); $E_{тар}$ — тарифная ставка оператора; $K_{нал}$ — коэффициент, учитывающий зарплату наладчика (в массовом производстве $K_{нал} = 1,10...1,15$); y — коэффициент штучного времени, учитывающий оплату труда оператора при многостаночном обслуживании (при количестве обслуживаемых станков 1; 2; 3; 4 коэффициент y равен соответственно 1; 0,65; 0,48; 0,39).

Значения K и α определяются из таблиц в зависимости от вида оборудования и его массы. Если таблиц нет, то K можно определить по формуле

$$K = (A_1C + A_2N_y + A_3P_M + A_4P_э) / 21,8,$$

где A_1, A_2, A_3, A_4 — коэффициенты, зависящие от типа оборудования и его массы; C — балансовая стоимость станка, определяемая как сумма его оптовой цены и затрат на транспортно-монтажные работы; N_y — установленная мощность двигателей; $P_M, P_э$ — ремонтная сложность соответственно механической и электрической частей станка.

Затраты на эксплуатацию инструмента за период его стойкости

$$Z_{и} = (C_{и} + C_{зат}K_{доп})\Phi\eta_{заг}K_{см}\tau_o / ((1 + K_{доп})T\tau_{шт}),$$

где $C_{и}$ — цена инструмента; $C_{зат}$ — стоимость его заточки; $K_{доп}$ — допустимое количество переточек; Φ — годовой фонд времени при работе в одну смену; $\eta_{заг}$ — коэффициент загрузки; $K_{см}$ — коэффициент сменности; $\tau_o, \tau_{шт}$ — соответственно основное и штучное время; T — стойкость инструмента.

Результаты проектирования технологического процесса оформляются в комплекте технологической документации, форма и содержание которой регламентируются Единой системой технологической документации, в зависимости от типа производства и группы технологического оборудования (универсальное, специализированное и специальное). Тип производства определяет степень детализации описания технологических процессов (маршрутное, маршрутно-операционное и операционное).

Для описания технологического процесса изготовления и контроля изделий по всем операциям в технологической последовательности с указанием соответствующих данных по оборудованию, оснастке, материальным, трудовым и другим нормативам используются маршрутные карты (МК по ГОСТ 3.1118—82). Для описания

технологического процесса изготовления деталей на станках с ЧПУ используются карты технологического процесса (КТП по ГОСТ 3.1404—86).

Операционные карты (ОК по ГОСТ 3.1118—82 и ГОСТ 3.1404—86) содержат описание технологического процесса изготовления изделия с расчленением операций по переходам и указанием параметров режимов обработки, расчетных норм и трудовых нормативов. Почти во всех операционных картах выделено место для операционного эскиза, отражающего графически состояние объекта производства после выполнения данной операции либо перехода или группы переходов в данной позиции. Достаточно объемные и сложные операционные эскизы с указанием схемы установки выполняются на отдельных картах эскизов (КЭ по ГОСТ 3.1404—86).

При оформлении КЭ возможно бестекстовое описание операции в ОК. При бестекстовой записи содержания основного перехода следует указывать номер перехода и номера поверхностей (размеров), выполняемых на данном переходе. Если данная поверхность обрабатывается за несколько переходов, то в скобках после номера поверхности указываются промежуточные размеры (на операционном эскизе указывается один окончательный для данной операции размер) с соответствующими допусками. Окончательные размеры, указанные на операционном эскизе, можно не приводить, ограничиваясь только записью их номера. Бестекстовая запись для вспомогательного перехода (например, установить заготовку в приспособлении, закрепить) не производится, если условных обозначений метода установки, указанных на операционных эскизах, достаточно.

При обработке на станках с ЧПУ, кроме КТП и ОК, следует оформлять карту наладки инструмента (КНИ по ГОСТ 3.1404—86) и карту кодирования информации (ККИ по ГОСТ 3.1404—86). На КНИ, кроме операционного эскиза, приводятся эскизы инструментов с указанием координат исходного положения инструментального блока (центр револьверной головки) или торца шпинделя и относительных координат формообразующих элементов инструментов. ККИ содержит описание управляющей программы.

В комплект технологических документов могут также входить ведомость оснастки, ведомость материалов, технологические инструкции и т. д. Выбор и определение состава технологических документов на технологический процесс (операцию) определяет организация (разработчик или потребитель документов).

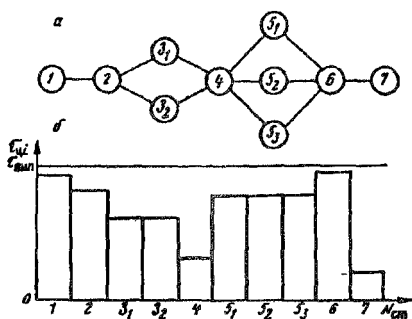
Технологическая информация, размещаемая на МК и КТП, распределяется по строкам с привязкой к служебным символам А, Б, О, Т и Р. В строке А приводятся номера цеха и участка, где выполняется данная операция, ее номер, код и наименование, а

также обозначение сопутствующих документов (например, номер инструкции по технике безопасности). В строке Б указывают код и модель технологического оборудования, код профессии, количество исполнителей, занятых на данной операции, количество одновременно обрабатываемых заготовок, объем производственной партии, коэффициент штучного времени (при многостаночном обслуживании), нормы подготовительно-заключительного и штучного времени. В строке О приводится текстовое (или бестекстовое) описание операции (перехода). В строке Р размещается информация, связанная с режимом обработки (длина рабочего хода, диаметр или ширина обрабатываемой поверхности, глубина резания, число проходов, подача, скорость резания и частота вращения). В строке Т задается описание (наименование, ГОСТ или код) применяемых при выполнении данной операции (перехода) приспособления, режущего, вспомогательного и измерительного инструментов.

6.5. Совершенствование технологических процессов

Потребность в совершенствовании технологических процессов возникает в тех случаях, когда необходимо увеличить выпуск изделий при минимальных капитальных затратах, снизить себестоимость, улучшить качество и надежность выпускаемой продукции для повышения ее конкурентоспособности. Методика решения этой задачи зависит от типа производства.

Первым шагом совершенствования технологических процессов является анализ исходной ситуации. В массовом производстве прежде всего необходимо определить баланс затрат времени по станочным операциям технологического процесса. Например, для поточной линии, схема которой показана на рис. 6.48, а, затраты циклового



времени $\tau_{ци}$ распределены по видам $N_{ст}$ станков, как это показано на рис. 6.48, б. Последняя схема ясно указывает, что на четвертой и седьмой операциях станки загружены очень мало. Недостаточно загружены станки также на третьей операции. А анализ баланса годовых затрат потребителя новой техники показал, что их максимальная доля приходит-

ся на эксплуатацию станка. Так, например, при двухсменной работе зубофрезерного полуавтомата 63,3% затрат приходится на амортизацию станка, 13,7 — на инструмент, 6,6 — на заработную плату рабочего и наладчика, 9,5 — на эксплуатацию здания (цеха) и 6,9% — на прочие надобности. При переходе на трехсменную работу затраты на станок несколько уменьшаются (до 58,3%).

Следовательно, если целью совершенствования технологического процесса является снижение себестоимости, то в первую очередь следует заниматься совершенствованием тех операций, на которых загрузка станка недостаточна. Если повысить производительность, например, на третьей операции (см. рис. 6.48) так, чтобы вместо двух станков применялся только один, или на пятой операции так, чтобы вместо трех станков требовались бы только два, то за счет уменьшения количества оборудования можно получить значительный эффект. Кроме того, следует сделать попытку распределения переходов четвертой и седьмой операций по другим станкам за счет совершенствования временной структуры их операций.

Если же целью совершенствования является увеличение объема выпускаемой продукции, то следует в первую очередь обратить внимание на операции с высокой степенью загрузки станков, так как у малозагруженного оборудования есть достаточный запас производительности. Повышение производительности операций на станках с высокой степенью загрузки возможно за счет совершенствования как их временной структуры, так и самих переходов.

В массовом производстве возможны следующие источники повышения эффективности технологических процессов: 1) повышение цикловой производительности; 2) снижение цены технологического оборудования; 3) повышение коэффициента его загрузки; 4) увеличение коэффициента сменности; 5) снижение цены режущего инструмента; 6) повышение его стойкости; 7) уменьшение площади цеха, занятой технологическим и транспортным оборудованием; 8) сокращение персонала (основного и вспомогательного).

На рис. 6.49 показано влияние некоторых источников повышения эф-

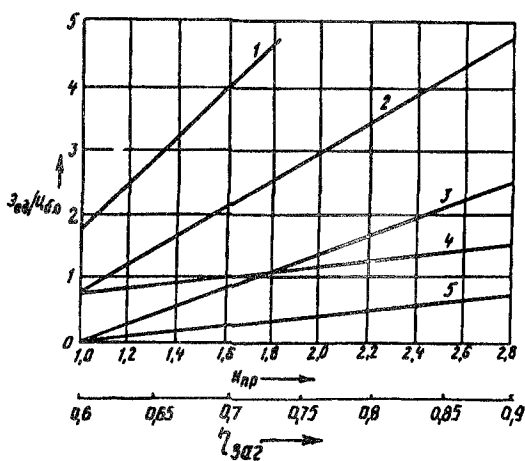


Рис. 6.49. Влияние индекса производительности $I_{пр}$ и коэффициента $\eta_{заг}$ загрузки станка на относительный экономический эффект

фективности на относительный экономический эффект от их использования. Кривая 5 отражает влияние увеличения коэффициента $\eta_{\text{заг}}$ загрузки от 0,6 до 0,9 при базовой цикловой производительности и двухсменной работе. Совместное влияние $\eta_{\text{заг}}$ и трехсменной работы характеризует кривая 4. Кривая 3 иллюстрирует влияние увеличения индекса $I_{\text{пр}}$ производительности от 1 до 2,8 при $\eta_{\text{заг}} = 0,6$ и двухсменной работе, а кривая 2 — совместное влияние $I_{\text{пр}}$ и трехсменной работы. Кривая 1 показывает совместное влияние увеличения $I_{\text{пр}}$, введения трехсменной работы и увеличения $\eta_{\text{заг}}$ до 0,9.

Относительным экономическим эффектом в данном случае будем называть отношение единичного экономического эффекта $\mathcal{E}_{\text{ед}}$ от использования нового оборудования к цене $C_{б.о}$ базового:

$$\mathcal{E}_{\text{ед}} = (\beta \Gamma_3 - \Gamma_3) / (p_2 + E_{\text{норм}}),$$

где β — коэффициент приведения, определяемый по выражению

$$\beta = I_{\text{пр}} \eta_{\text{заг}} K_{\text{см}2} / (\eta_{\text{заг}} K_{\text{см}1})$$

(индекс 1 относится к базовому варианту технологического процесса, а 2 — к новому); $K_{\text{см}}$ — коэффициент сменности; Γ_3 — годовые затраты; p — доля амортизационных отчислений на полное восстановление станка; $E_{\text{норм}}$ — нормативный коэффициент экономической эффективности.

Зависимости, приведенные на рис. 6.49, относятся к зубофрезерному полуавтомату. Они не учитывают снижения эффективности, связанного с удорожанием оборудования и оснастки. Влияние других источников повышения эффективности (площадь цеха, стойкость инструмента, численность персонала) оказалось несущественным по сравнению с влиянием $I_{\text{пр}}$, $\eta_{\text{заг}}$, $K_{\text{см}}$ и снижением цены станка.

Если целью совершенствования технологического процесса является повышение качества выпускаемых изделий в условиях массового производства, то необходимо сначала проанализировать точность и стабильность базового технологического процесса по переходам и операциям, выявить источники погрешностей. Затем на основании анализа можно разработать мероприятия, повышающие точность и стабильность технологического процесса, как это изложено в гл. 4.

Однако массовое производство в машиностроении, даже в самых передовых странах с высокой степенью кооперирования и специализации, не превышает 12...15 %, а в сумме с крупносерийным производством составляет не более 25...30 %. Остальной (преобладающей) частью производства в машиностроении (70...80 %) является серийное и мелкосерийное, когда методы повышения

эффективности, принятые для массового производства, неприемлемы. Во-первых, это связано с тем, что повышение производительности и уровня автоматизации не должно понижать технологическую гибкость серийного производства. Это значит, что затраты, связанные с переналадкой оборудования и оснастки при переходе к обработке новой детали (нового изделия), не должны быть слишком высокими. Во-вторых, необходимо предусмотреть снижение потерь времени (простоя оборудования), связанных с организационными и техническими причинами.

Потери производительности в серийной производственной системе связаны с несовершенством оборудования, техническими и организационными причинами, переналадкой, простоями в третью смену, выходными и праздничными днями. Расширение технологических возможностей, повышение жесткости и быстроходности, а также повышение удобства обслуживания технологического оборудования позволяют частично скомпенсировать влияние потерь, связанных с несовершенством оборудования. Повышение структурной и организационной гибкости оборудования и системы управления позволяет частично скомпенсировать потери, связанные с техническими и организационными причинами. А повышение технологической гибкости оборудования позволяет снижать потери на его переналадку. Простой оборудования, связанные с третьей сменой, выходными и праздничными днями, могут быть уменьшены за счет повышения уровня автоматизации вплоть до организации «безлюдного» режима работы в третью смену, выходные дни и праздники.

При повышении уровня автоматизации следует соблюдать следующие принципы: 1) системы и средства автоматизации должны не просто имитировать и замещать действия человека, а выполнять производственные функции быстрее и лучше; 2) автоматизация должна быть комплексной, т. е. охватывать все важнейшие компоненты производства, и обязательно сопровождаться повышением уровня прогрессивности технологии; 3) средства автоматизации, включая самые перспективные и прогрессивные, должны применяться не там, где их можно приспособить, а в первую очередь там, где без них уже нельзя обойтись; 4) внедрение и тиражирование недостаточно созревших технических решений недопустимо.

Гибкая автоматизация с использованием современных систем микропроцессорного управления позволяет увеличивать фактическую производительность до возможной, приближающейся к теоретически-цикловой.

Одним из основных методов сокращения потерь, связанных с переналадкой оборудования при переходе к изготовлению новых деталей, является организация производственной системы (участка, цеха и т. д.) на базе групповой технологии. *Групповая технология* — это особая организационно-технологическая концепция. Цен-

тральным понятием групповой технологии является понятие группы деталей, которая формируется из всего их массива по конструктивным и технологическим признакам подобия.

К *конструктивным признакам подобия* относятся: габаритные размеры детали, форма, относительное расположение, размеры, точность и шероховатость как обрабатываемых поверхностей, так и технологических баз, а к *технологическим признакам* — технологический маршрут, приспособления и инструментальные наладки. В группу целесообразно объединять детали с минимальными вариациями в структуре операций, комплексе обрабатывающего инструмента и схеме базирования.

В общем случае группирование деталей осуществляется в три этапа. **П е р в ы й** этап — укрупненное группирование с перераспределением значимости определяющих характеристик, т. е. создание нескольких предварительных вариантов групп. **В т о р о й** этап — разработка структур производственных систем с их оценкой по коэффициенту загрузки технологического оборудования и с перегруппированием деталей для максимального повышения эффективности. **Т р е т ь и й** этап — анализ параметров деталей в группе для выделения комплексной детали, которая представляет собой совокупность всех поверхностей каждой из деталей группы.

После выделения (формирования) комплексной детали на нее разрабатывается групповой технологический процесс, который: 1) обеспечивает экономическое изготовление всех деталей, входящих в группу; 2) предусматривает преимущественно нормальный режущий и вспомогательный инструмент, набор которого обеспечивает обработку всех деталей группы; 3) закладывает групповые станочные приспособления, обеспечивающие быструю переналадку при переходе с одной на другую деталь группы.

Результатом использования групповой технологии является повышение уровня серийности выпуска комплексной детали, что позволяет реже переналаживать станки, организовывать гибкое поточное производство со всеми его преимуществами. Возможны три наиболее характерных случая организации групповой производственной системы.

1. В группы объединяются детали с циклом изготовления на оборудовании одного типа. Здесь заготовки с незаконченным циклом обработки обрабатываются на одной групповой операции, а на остальных (если это требуется) входят в другие группы или просто подаются на индивидуальную (обычно отделочную) обработку. Этот метод классификации охватывает наибольшее количество деталей и особенно эффективен, если технологический процесс у всех деталей, входящих в данную группу, однооперационный. Кроме того, в таких случаях существенно повышается культура рабочих мест.

2. Детали группы имеют общий многооперационный технологи-

ческий процесс, выполняемый на разнотипном оборудовании. Они либо проходят последовательно через все детали-операции группового технологического процесса, либо имеют как общие, так и отдельные специфические детали-операции.

3. Объединяются детали нескольких групп, обладающих общностью технологического маршрута, выполняемого на разнотипном оборудовании. Имеют место детали-операции не только одной группы, но и нескольких групп.

Во втором и третьем случаях обработку заготовок обычно ведут на оборудовании, расположенном в порядке последовательности групповых операций, с применением на каждой операции групповых станочных приспособлений и инструментальных наладок, а если необходимо, и специализированного оборудования. Насыщение технологического и вспомогательного оборудования современными системами ЧПУ, которые, с одной стороны, повышают уровень его автоматизации, а с другой — уровень гибкости, существенно облегчает внедрение групповой технологии.

При организации групповой производственной системы, когда изготавливаются не только группы, но и не входящие в группы отдельные детали, необходимо четко определить дисциплину обслуживания (переналадки) станочного оборудования. Наиболее распространенными дисциплинами обслуживания очереди являются: FIFO — первым пришел — первым обслужен; SCT — из очереди вызывается заготовка, имеющая наименьшее время обработки и переналадки; ALT — из очереди вызывается заготовка с наладкой, соответствующей текущей наладке оборудования (альтернирующий приоритет); ALT + FIFO и ALT + SCT (комбинации дисциплин).

Имитационное моделирование дисциплин обслуживания на ЭВМ показало, что наилучшие результаты обеспечивают комбинированные дисциплины обслуживания с приоритетами, учитывающими текущую наладку оборудования. Они существенно снижают длительность производственного цикла изготовления деталей и объем незавершенного производства.

6.6. Проектирование операций обработки на токарно-револьверных автоматах и полуавтоматах

6.6.1. Технологические возможности токарно-револьверных автоматов и полуавтоматов

На токарно-револьверных автоматах и полуавтоматах обрабатываются поверхности вращения и резьбы на деталях класса «тела вращения». В отдельных случаях по специальному заказу они снабжаются фрезерными приспособлениями для обработки лысок и канавок, а также сверлильными приспособлениями для поперечного сверления.

Формообразование поверхностей вращения осуществляется путем следующих переходов: 1) продольное и поперечное (предварительное и чистовое) обтачивание; 2) сверление, зенкерование, растачивание и развертывание отверстий; 3) обкатывание и раскатывание шариками или роликами; 4) выглаживание алмазными или твердосплавными наконечниками наружных и внутренних поверхностей.

Наружная резьба нарезается плашкой или резьбонарезной головкой либо накатывается резьбонакатной головкой. Внутренняя резьба обычно нарезается метчиком либо раскатывается метчиком-раскатником.

Главным преимуществом обработки на токарно-револьверных автоматах и полуавтоматах является достаточно высокая концентрация переходов (последовательная, параллельная, при совмещении переходов, выполняемых инструментами револьверной головки и поперечных суппортов, и параллельно-последовательная). Нежелательно, правда, совмещать обтачивание заготовки широким фасонным резцом (15...25 мм и более) со сверлением отверстий, диаметр которых меньше 4 мм, так как при этом возможен увод сверла.

Автоматы имеют шести- или восьмипозиционную револьверную головку и три-четыре поперечных суппорта. Рабочий шпиндель станка может автоматически изменять частоту и направление вращения. При основном левом направлении вращения шпинделя обычно выполняют точение, сверление, зенкерование и отрезку, а при правом вращении, частота которого в 2...5 раз меньше, — нарезание (накатывание) резьб, развертывание, раскатывание. Свинчивание инструмента после формообразования резьбы осуществляется на быстром левом вращении.

Для каждой позиции револьверной головки и каждого суппорта может быть предусмотрена своя подача, которая в процессе обработки в соответствии с профилем кулачка может увеличиваться, уменьшаться или прекращаться. Револьверная головка может настраиваться на поворот через позицию, когда для обработки простой детали требуется мало инструментов.

Ряд станков, в том числе и автоматы унифицированной гаммы *E*, имеют возможность автоматического переключения на ускоренное вращение распределительного вала, что позволяет сокращать машинное время при использовании одного комплекта кулачков для изготовления разных деталей.

6.6.2. Методические рекомендации по построению операций и проектированию наладок

Обычно все переходы операции распределяются на три последовательно выполняемых этапа: 1) предварительная обработка; 2) чистовая обработка; 3) нарезание (накатывание) резьбы и от-

резание. Канавки и фаски рекомендуется выполнять после предварительной обработки перед чистовой.

Порядок и особенности обработки поверхностей внутри этапов выбираются в соответствии со следующими рекомендациями:

- 1) чтобы уменьшить суммарную длину рабочих ходов при обработке ступенчатых поверхностей, наружное продольное точение начинают с меньшей ступени (если нет ограничений по глубине резания), а затем последовательно увеличивают диаметр обработки; последовательное сверление ступенчатого отверстия набором сверл осуществляют в обратном порядке (от большего диаметра к меньшему);
- 2) перед сверлением отверстия диаметром менее 10 мм проводится центрование коротким жестким сверлом с углом в плане 90° на глубину, обеспечивающую образование фаски заданного размера;
- 3) при сверлении глубоких отверстий (отношение длины к диаметру больше 10) необходимо предусматривать промежуточный вывод сверла для его очистки от стружки (первый — после глубины отверстия $l = 3d$, второй — после приращения длины на $l = 2d$, третий и все последующие — после каждого приращения $l = d$);
- 4) при работе фасонным инструментом, центровании, точении канавок и фасок, а также поперечном накатывании необходимо предусматривать останов суппорта на 4...5 оборотов шпинделя;
- 5) обтачивание заготовки с отношением длины к диаметру, большим 5, следует выполнять с использованием люнетных державок;
- 6) применять комбинированный инструмент (сверло-зенкер, зенкер-развертку и т. п.) следует при нехватке числа позиций в револьверной головке.

Проектирование наладки начинается с вычерчивания эскизов каждого инструментального (блочного) перехода (рис. 6.50, где L_0 — расстояние от торца шпинделя до револьверной головки; L — расстояние от торца шпинделя до кромки отрезного резца шириной b (обычно 5...10 мм); L_1 — расстояние от второй кромки отрезного резца до режущей кромки инструмента, установленного в державке револьверной головки с вылетом L_2 ; L_3 — зазор между опорной поверхностью державки и револьверной головкой).

Затем определяют минимальное расстояние от револьверной головки до торца шпинделя и

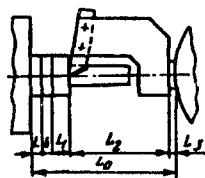


Рис. 6.50. Схема определения расстояния от торца шпинделя до револьверной головки

максимальный рабочий ход револьверного суппорта, что должно соответствовать технической характеристике автомата. Так, для автоматов 1Б125 и 1Б140 наименьшее расстояние от револьверной головки до торца шпинделя составляет 75 мм, наибольшее расстояние — 210 мм, наибольший ход револьверной головки — 110 мм, перемещение поперечного суппорта — 35 мм.

Инструменты располагают в гнездах револьверной головки в соответствии с порядком их вступления в работу и так, чтобы они не мешали друг другу. При этом державки резцов поворачивают вокруг оси гнезда в положение, когда основная плоскость, включающая вершину резца, проходит через ось поворота револьверной головки. В этом случае погрешность ее фиксации δ_1 почти не влияет на погрешность обработки δ_2 . При рекомендуемом расположении державки

$$\delta_2 = \delta_1^2/d,$$

где d — диаметр обработанной поверхности.

Если основная плоскость занимает положение, перпендикулярное к рекомендуемому, то погрешность фиксации полностью переносится на размер обработки. Вычисления показали, что правильное расположение державки снижает влияние погрешности фиксации в 100...300 раз.

Для каждого из переходов необходимо определить оптимальные значения подач s_i, s_j и частот вращения шпинделя n_i и n_j , где индекс i относится к инструментам револьверной головки, а индекс j — к инструментам поперечных суппортов. При этом нужно учитывать, что число разных частот вращения в одной операции не может превышать определенного для каждой модели автомата значения (например, для автоматов 1Б125 и 1Б140 это 6). Из полученных значений частот вращения шпинделя выбирается «лимитирующая» $n_j = n_0$.

Для определения частоты вращения распределительного вала необходимо определить время цикла обработки $\tau_{ц}$:

$$\tau_{ц} = \tau_{3.3} + \sum_{i=1}^m (\tau_{oi} + \tau_{xi}) + \sum_{j=1}^k (\tau_{oj} + \tau_{xj}), \quad (6.8)$$

где $\tau_{oi} = L_i/(n_i s_i) + \tau_{выс i}$; $\tau_{oj} = L_j/(n_j s_j) + \tau_{выс j}$; $\tau_{3.3}$ — время подачи заготовки (прутка) до упора и ее закрепления; m — число переходов револьверной головки; τ_o — основное время; τ_x — время холостых ходов; k — число переходов поперечных суппортов; L — длина рабочего хода; $\tau_{выс}$ — время выстоя. Значения $\tau_{3.3}, \tau_x$ и $\tau_{выс}$ определяются из паспорта станка.

Частота вращения распределительного вала определяется выражением $n_{р.в} = 1/\tau_{ц}$ и уточняется по паспорту станка.

6.6.3. Алгоритм проектирования кулачка подачи револьверной головки

Расчет и проектирование дискового кулачка подачи револьверной головки включает: 1) определение числа сотых делений окружности кулачка, приходящихся на рабочие ($u_{раб}$) и холостые (u_x) ходы; 2) определение радиусов начала ($R_{нач}$) и конца ($R_{кн}$) рабочих и холостых участков кулачка; 3) вычерчивание кулачка с указанием размеров и технических требований.

Расчеты числа сотых делений удобнее проводить, используя вместо времени приведенное число оборотов шпинделя (N). Для этого умножим правую и левую части равенства (6.8) на «лимитирующую» частоту вращения шпинделя n_0 . Тогда

$$N_{ц} = N_{3.3} + \sum_{i=1}^m (K_i N_{раб} + N_{выс} + N_x)_i + \sum_{j=1}^k (K_j N_{раб} + N_{выс} + N_x)_j,$$

где $N_{раб i} = L_i/s_i$; $N_{раб j} = L_j/s_j$; $N_{выс} = 2...4$; K_i, K_j — коэффициенты приведения, $K_i = n_0/n_i$; $K_j = n_0/n_j$.

Вначале определяются радиусы начала и конца рабочих движений. Для этого определяют минимальные расстояния от торца шпинделя до револьверной головки (L_{0i}) у всех переходов (см. рис. 6.50). Из них выбирается самое меньшее L_{min} , которое соответствует максимальному радиусу (радиусу заготовки) кулачка (у автоматов 1Б125 и 1Б140 $R_{max} = 120$ мм). Затем вычисляются разности $rL_i = L_{0i} - L_{min}$.

Радиус $R_{кн}$ конца i -го рабочего хода определяется следующим выражением:

$$R_{кн i} = R_{max} - rL_i,$$

а радиус $R_{нач i}$ начала —

$$R_{нач i} = R_{кн i} - L_i.$$

Для расчета числа сотых делений на каждый i -й рабочий ход сначала по паспорту станка выбираются значения $N_{выс i}$, $N_{выс j}$ и $N_{3.3}$. Затем в зависимости от времени цикла $\tau_{ц}$ и разности между $R_{кн i}$ и $R_{нач i-1}$ из таблиц в паспорте станка выбираются значения $u_{x i}$ и $u_{x j}$.

Суммарное значение числа сотых делений (U_x) на холостые

движения определяется по формуле

$$U_x = \sum u_{xi} + \sum u_{xj},$$

а суммарное приведенное число оборотов на рабочие перемещения

$$N_{\text{раб}} = \sum (N_{\text{раб}} + N_{\text{выс}})_i + \sum (N_{\text{раб}} + N_{\text{выс}})_j.$$

Коэффициент приведения q вычисляется по формуле

$$q = (100 - U_x) / N_{\text{раб}}.$$

Тогда число сотых делений на каждый i -й и j -й рабочие ходы можно вычислить по формулам:

$$u_{\text{раб}i} = qN_{\text{раб}i}; \quad u_{\text{раб}j} = qN_{\text{раб}j}.$$

Вычерчивание кулачка осуществляют на выполненном в масштабе 1:1 чертеже его заготовки с нанесенными на нем 100 равноотстоящими друг от друга делениями (радиальными лучами). Лучи соответствуют траектории движения ролика рычага, перемещающего бабку револьверной головки. В соответствии с результатами расчета отмечают лучи начала и конца каждого рабочего и холостого переходов. Например, от нуля до второго деления отмечают подачу и зажим прутка, от второго до четвертого — поворот револьверной головки, от четвертого до двадцать третьего — обтачивание заготовки и т. д.

На лучах, соответствующих началу и концу рабочего хода, циркулем из центра кулачка наносятся значения $R_{\text{нач}}$ и $R_{\text{кн}}$. Рабочий участок AB кулачка является кривой, близкой к архимедовой спирали. Участки холостых ходов строятся с помощью соответствующих шаблонов (рис. 6.51).

При проектировании кулачка револьверной головки следует учитывать, что: 1) на участках подачи и закрепления заготовки, а также на участках, соответствующих несовмещенным переходам поперечных суппортов, на кулачке подачи револьверной головки

нет подъема или опускания, т. е. $R_{\text{нач}} = R_{\text{кн}}$; 2) при обтачивании фасонным резцом соответствующий участок делится на два: на первом (75%) подача увеличивается в 1,2 раза, а на втором — уменьша-

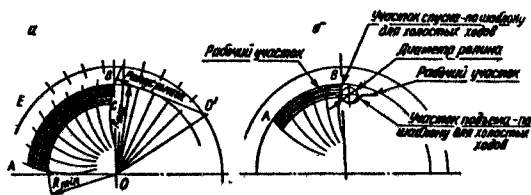


Рис. 6.51. Рабочие и холостые участки кулачка подачи револьверной головки:

a — построение рабочего участка; b — построение участков спуска и подъема для холостых ходов

ется в 2,5 раза; 3) подъем участка кулачка для нарезания или накатывания резьбы с самоподачей инструмента должен быть в пределах 0,8...0,85 его рабочего хода; дополнительное перемещение инструмента обеспечивается подвижной частью его державки; 4) участок кулачка для свинчивания резьбонарезного инструмента строится по архимедовой спирали.

6.7. Проектирование операций обработки на станках с ЧПУ

6.7.1. Классификация и технологические характеристики оборудования

Станки с ЧПУ классифицируются по ряду признаков.

1. В зависимости от реализуемых на них способов формообразования выделяются следующие группы станков с ЧПУ: токарные, сверлильно-расточные, фрезерные, шлифовальные, электроэрозионные и лазерные. К особой группе относят многоцелевые станки, на которых может быть выполнена комбинированная сверлильно-фрезерно-расточная операция обработки корпусных и плоских деталей, а также многоцелевые станки для обработки тел вращения, на которых наряду с токарной обработкой осуществляются фрезерование и поперечное сверление (расточивание).

2. Станки с ЧПУ оснащаются одним из следующих устройств управления приводами подач:

- 1) *позиционным (Ф2)* — для управления позиционированием рабочих органов станка (применяется в основном для сверлильных и расточных станков);
- 2) *непрерывным или контурным (Ф3)* — для управления траекториями движения подач при обработке сложных профилей (плоских и объемных) на токарных, фрезерных, электроэрозионных и многоцелевых станках;
- 3) *универсальным или комбинированным (Ф4)* — как для контурной, так и для позиционной обработки.

В станках, относящихся к группам Ф3 и Ф4, управление возможно по двум, трем, четырем и пяти осям координат, которые обозначаются согласно стандарту.

3. По количеству используемых в одной операции инструментов станки с ЧПУ делятся на одно- и многоинструментные, в которых инструменты размещаются в револьверной головке (Р) либо в магазине (М).

Наиболее часто используемые временные структуры операций обработки на станках с ЧПУ соответствуют следующим кодам:

$$P_1^0 I_1^0 D_1^0 Z_1^{\text{пд}}, P_1^0 I_1^1 m D_1^0 Z_1^{\text{пд}}, P_1^0 I_1^1 m D_1^0 Z_2^{\text{пд}}; P_1^0 I_1^1 m D_1^1 k Z_1^{\text{пд}}.$$

На фрезерных и многоцелевых станках имеется возможность операции со структурой, соответствующей коду $P_n^1 I_n^1 m D_1^0 Z_1^{\text{пд}}$ (см., например, рис. 6.33).

Кроме характерных для обработки на обычных станках погрешностей, при обработке на станках с ЧПУ следует учитывать еще и погрешности, вызванные системой управления. Это погрешности позиционирования и выхода на нуль, которые для станков нормальной точности в зависимости от длины перемещения (20...500 мм) изменяются от 8 до 25 мкм, погрешности в режиме интерполяции, проявляющиеся в виде волнистости профиля, высота и шаг которой зависят от точности изготовления (сборки) привода подач и угла подъема профиля. Кроме того, привод подач станка не всегда точно отрабатывает команды устройства ЧПУ (УЧПУ). При обработке на станках с ЧПУ погрешности, связанные с упругими деформациями технологической системы, несколько меньше (не более 10% в общем балансе), а погрешности настройки существенно больше (до 60%) влияют на общую точность обработки, чем на станках с ручным управлением.

Источниками экономической эффективности обработки на станках с ЧПУ являются: 1) сокращение времени на размерную настройку; 2) снижение затрат на изготовление программносителя для обработки фасонных поверхностей; 3) увеличение доли основного времени в штучном (для универсальных станков с ручным управлением $\tau_0 \approx 0,3\tau_{\text{ш}}$, а для станков с ЧПУ $\tau_0 \approx 0,7\tau_{\text{ш}}$); 4) высокая степень концентрации переходов в операции.

Эффективность обработки на станках с ЧПУ повышается с увеличением сложности детали (обработки), которая характеризуется коэффициентом конструктивно-технологической сложности

$$C_{\text{КТ}} = 0,02 \sum_{i=1}^k \beta_i,$$

где k — количество конструктивных элементов заготовки, обрабатываемых на рассматриваемой операции; β_i — весовой коэффициент,

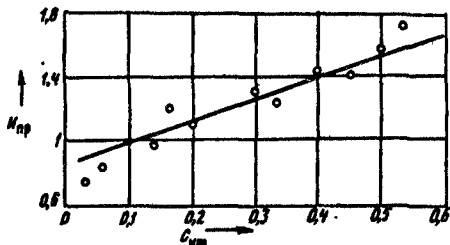


Рис. 6.52. Зависимость эффективности обработки на станке с ЧПУ (индекса производительности $I_{\text{пр}}$) от коэффициента $C_{\text{КТ}}$ конструктивно-технологической сложности детали

отражающий относительную трудоемкость обработки i -го элемента заготовки на станке с ручным управлением по сравнению с трудоемкостью его обработки на станке с ЧПУ.

Табл. 6.14. Значения весовых коэффициентов

Тип поверхности	β_i
Цилиндрическая наружная и торцовая	1
Цилиндрическая внутренняя	1,5
Коническая наружная	1,8
Коническая внутренняя	2
Резьба наружная	5
Резьба внутренняя	7
Фасонная наружная	10
Фасонная внутренняя	12

Значения β_i для токарных станков приведены в табл. 6.14. Пример экспериментально установленной зависимости индекса производительности $I_{пр}$ от $C_{кт}$ для токарной обработки показан на рис. 6.52.

6.7.2. Требования к технологичности деталей, изготавливаемых на станках с ЧПУ

Лучше всего, если технологичность деталей, подлежащих изготовлению на станках с ЧПУ, будет обеспечена в процессе разработки конструкторской документации. В противном случае возникает необходимость в анализе (конструкторско-технологической проработке) всех чертежей деталей с целью выявления нетехнологичных элементов и возможности повышения технологичности конструкции деталей, что обычно оформляется в виде запроса в отдел главного конструктора предприятия. Повышение технологичности достигается путем изменения формы и размеров отдельных компонентов детали без снижения качества выполнения ею функций.

Для повышения технологичности желательно: 1) провести унификацию формы и размеров таких элементов детали, как галтели, канавки, карманы и т. д., что позволит сократить номенклатуру необходимых инструментов; 2) задать криволинейные участки профиля детали либо минимальным числом дуг окружности, либо

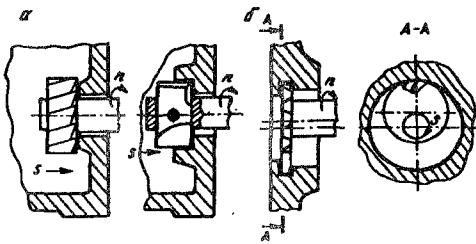


Рис. 6.53. Компоненты корпусных деталей, нетехнологичные для обработки на станках с ЧПУ

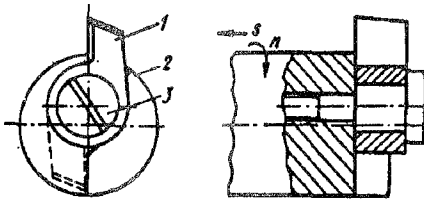


Рис. 6.54. Схема оправки с автоматизацией вывода резца в рабочую позицию

выточки у основных отверстий, к которым нет открытого доступа, так как они расположены внутри корпусной детали (рис. 6.53,а); канавки для выхода расточного резца (рис. 6.53,б). Для обработки внутренних торцов и выточек, показанных на рис. 6.53,а, на станке с ЧПУ необходима специальная оправка с автоматически убирающимся при реверсе резцом (рис. 6.54). Резец 1 выводится в рабочее положение центробежными силами и удерживается в нем силами резания и реакции выступа 2. При реверсе оправки резец за счет трения об обработанный торец убирается в исходное положение, поворачиваясь вокруг оси винта 3.

Канавки, показанные на рис. 6.53,б, можно обработать только дисковой фрезой с круговым врезанием и круговой подачей, что на порядок менее производительно, чем растачивание такого элемента на токарном станке.

Если корпусная деталь не имеет конструктивных элементов, которые можно использовать в качестве технологических баз (например, отверстий), то их следует предусмотреть. В таких случаях наименьшие допустимые диаметры базовых отверстий d_{\min} при максимальном габаритном размере L заготовки имеют следующие значения:

L , мм	До 100	100...200	200...1000	1000...2000
d_{\min} , мм	4	6	10	16

уравнением $y = f(x)$, что упростит программу; 3) обеспечить свободный доступ инструмента для обработки каждой поверхности; 4) исключить наклонные обрабатываемые стенки (имитация штамповочных уклонов); 5) проставить размеры в прямоугольной системе координат и по возможности от единых конструкторских баз, чтобы звенья размерных цепей имели двусторонний допуск (\pm).

Нетехнологичными при обработке на фрезерно-расточных станках являются: длинные отверстия ($L/d > 5...6$); торцы и

В случае необходимости следует предусмотреть в детали приливы для размещения отверстий — технологических баз.

6.7.3. Методика проектирования операций обработки на станках с ЧПУ

Исходными для синтеза операций обработки на станке с ЧПУ являются те же данные, что и для синтеза операций обработки на станке с ручным управлением (РУ), т. е. вся информация о распределенных по этапам типовой схемы изготовления детали переходах обработки ее типовых компонентов (см. п. 6.4.5). Однако к традиционным для станков с ручным управлением структурным и параметрическим сведениям об операции для станков с ЧПУ необходимо добавить схему наладки и управляющую программу.

Первым шагом синтеза операции является оценка возможности совмещения в одной операции переходов предварительного и чистового этапов. Это допустимо только при достаточной жесткости заготовки, за счет чего можно обеспечить уменьшение влияния погрешностей закрепления и релаксации на окончательную точность обработки. Необходимо также проверить рациональность «усложнения» заготовки путем формирования структуры операции с несколькими рабочими позициями ($П_n^1$, рис. 6.33). Оценкой эффективности применения станка с ЧПУ будет коэффициент сложности $C_{кт}$, вычисленный для совмещенных в рассматриваемой операции переходов.

На втором шаге синтеза операции необходимо окончательно разработать схему установки заготовки, выбрать вид приспособления и схему его ориентации в рабочем пространстве станка. Затем окончательно выбирается необходимый режущий и вспомогательный инструмент (приспособления для установки инструмента).

Для токарной обработки наружных цилиндрических, конических и торцовых поверхностей в большинстве случаев используют правые и левые проходные резцы (черновые и чистовые). Для обработки наружных цилиндрических, торцовых и угловых канавок применяются соответствующие канавочные резцы, а для резб — резбовые. Плашки и гребенки использовать не рекомендуется.

Если в заготовке детали с внутренними поверхностями не предусмотрено сквозное отверстие, то в номенклатуру инструментов токарного станка необходимо включить спиральные сверла. Токарная обработка внутреннего контура заготовки осуществляется расточными резцами (проходными, канавочными и резбовыми). Зенкеры, развертки и метчики на токарных станках с ЧПУ обычно не применяются.

Для обработки отверстий на сверлильно-расточных и многоцелевых станках используются: центровочные сверла и зенковки, сверла, зенкеры, резцы к расточным оправкам и фрезы для круговой обработки канавок в отверстиях. Торцы отверстий обрабатываются зенковкой, или цековкой с направлением, или фрезой. Чистовая обработка отверстий осуществляется развертками или резцами, а резьбонарезание — метчиками.

На фрезерных и многоцелевых станках для обработки плоскостей выбирают торцовые фрезы, а для обработки контуров и канавок — концевые. При обработке открытых плоских областей конфигурация детали не налагает ограничений на диаметр фрезы, и его выбирают максимально допустимым по другим ограничениям. При торцовом фрезеровании ребер диаметр фрезы D_{ϕ} целесообразно назначать из условия $D_{\phi} = (5...10)b + 2r$, где b — окончательная ширина ребра; r — радиус скругления у торцевой режущей кромки фрезы.

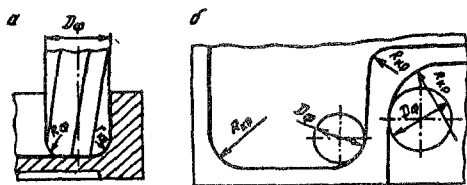


Рис. 6.55. Схемы обработки, ограничивающие диаметр фрезы

При обработке контуров, а также полуоткрытых, закрытых и комбинированных областей (рис. 6.55) максимальный диаметр концевой фрезы ограничивается наименьшими радиусами $r_{кр}$ контура в вертикальной плоскости (рис. 6.55,а) и $R_{кр}$, образующими вогнутость на контуре в горизонтальной плоскости (рис. 6.55,б), т. е. $D_{\phi} \geq 2r_{кр}$ или $D_{\phi} \leq 2R_{кр}$. Для обеспечения жесткости концевой фрезы необходимо соблюдать условие $H \leq 2,5D_{\phi}$, где H — высота фрезеруемого контура.

На данном шаге решается также вопрос о необходимости инструментов-дублеров. Если $N_{\text{парт}}\tau_{oi} < T_i$, где $N_{\text{парт}}$ — размер партии заготовок; τ_{oi} — основное время на i -й инструментальный переход, определяемое по приближенным формулам (6.4); i — номер инструмента, то дублеров для данного инструмента не нужно. Если $N_{\text{парт}}\tau_{oi} \approx T_i$, то необходим контроль за степенью износа инструмента. Если $N_{\text{парт}}\tau_{oi} > T_i$, то предусматривается дублер.

Затем уточняется модель станка с ЧПУ. Если на нем не хватает гнезд для инструментов, то операция разбивается на две либо используется комбинированный инструмент.

На третьем шаге синтеза операции выбирается последовательность выполнения переходов. При выборе можно руководствоваться следующими рекомендациями.

При токарной обработке в центрах рекомендуется следующая последовательность переходов: 1) предварительная обработка поверхностей основного контура для удаления напусков; 2) обработка дополнительных элементов (канавок, закрытых поверхностей); 3) чистовая обработка поверхностей основного контура и (если нужно) дополнительных элементов; 4) обработка резьбовых поверхностей (предварительная и чистовая).

При токарной обработке в патроне рекомендуется следующая последовательность выполнения переходов: 1) центрование (выполняется при необходимости сверления отверстия диаметром менее 20 мм); 2) сверление (если отверстие ступенчатое, то сначала большим, а затем меньшим сверлом); 3) предварительное и окончательное подрезание торца; 4) предварительное обтачивание поверхностей основного наружного контура (для удаления напусков); 5) предварительное растачивание поверхностей основного внутреннего контура (для удаления напусков); 6) предварительная и чистовая обработка дополнительных элементов наружного, а затем внутреннего контура; 7) чистовая обработка поверхностей основного внутреннего, а затем наружного контура; 8) предварительная и чистовая обработка резьб.

Напуск при токарной обработке удаляется из полуоткрытых и закрытых зон (открытые зоны являются исключением) обычно за несколько проходов согласно следующим типовым схемам:

- 1) *петля* — по окончании рабочего хода инструмент отводится на расстояние около 0,5 мм от обработанной поверхности, возвращается (на ускоренной подаче) назад и затем подается к оси заготовки для нового рабочего прохода (применяется в нескольких разновидностях для обработки полуоткрытых зон);
- 2) *виток (зигзаг)* — рабочие проходы осуществляются на прямой и обратной подачах (может применяться в зонах всех видов);
- 3) *спуск* — напуск удаляется за несколько проходов при радиальной подаче резца.

Чаще всего для удаления напусков в полуоткрытых зонах используются схемы *петля с подборкой* (рис. 6.56, а), когда после прямолинейного рабочего хода инструмент, согласно управляющей программе, переме-

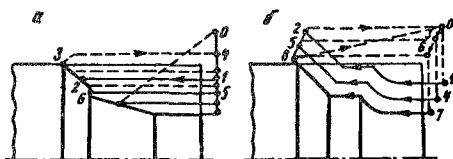


Рис. 6.56. Схемы стандартных циклов удаления напуска на токарном станке с ЧПУ

щается вдоль чернового контура детали вплоть до уровня предыдущего прохода, и *эквидистантная петля* (рис. 6.56, б), когда траектория рабочего хода эквидистантна профилю детали.

При предварительной обработке плоских поверхностей заготовок корпусных деталей, рычагов и планок сначала фрезеруются плоскости, ограничивающие габаритные размеры детали, а затем удаляется напуск из полуоткрытых и закрытых зон (окна, пазы, уступы и т. д.).

При многопроходном, 2,5-координатном фрезеровании применяются схему виток (зигзаг), а также *спираль*. Недостатком первой схемы является переменный характер фрезерования (встречное и попутное), что отрицательно сказывается на точности обработки. Зигзагообразная схема в данном случае имеет три разновидности, связанные с порядком обхода границ области обработки: 1) без обхода границ; 2) с проходом вдоль границ в конце обработки области; 3) с предварительным обходом границ области. Предварительная прорезка границы облегчает условия работы инструмента в конце каждой строки (рис. 6.57, а).

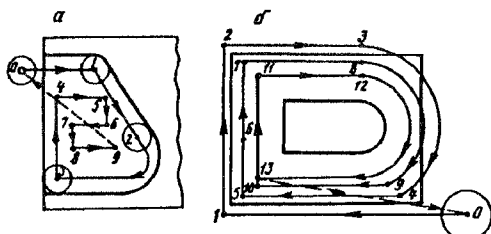


Рис 6.57 Схемы стандартных циклов удаления напуска на фрезерном станке с ЧПУ:

а — зигзаг с предварительной прорезкой границы; б — спираль

Спиралевидная схема фрезерования отличается тем, что подача инструмента осуществляется до спирали, форма которой подобна границе области обработки, с движением к центру области или от него (рис. 6.57, б). При использовании этой схемы сохраняется постоянное направление фрезерования.

При объемном фрезеровании управление перемещением концевой фрезы с круговой кромкой радиусом R_{ϕ} на торце должно осуществляться с учетом допустимой высоты гребешков Δ_h , которые остаются на обработанной поверхности из-за дискретности перемещения на новый уровень (строку обхода). Допустимое смещение ΔS вдоль сечения поверхности (рис. 6.58) определяется выражением

$$\Delta S \leq \sqrt{8\Delta_h R_{\phi}},$$

если радиус кривизны ρ_0 контура сечения обработанной поверхности в точке смещения очень велик (рис. 6.58, а), или

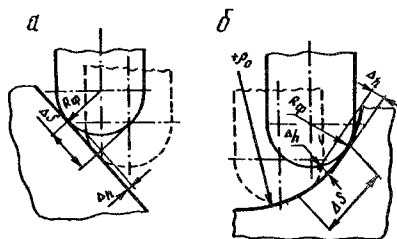


Рис. 6.58. Схемы смещения инструмента при переходе на новую строку объемного фрезерования

$$\Delta S \leq \sqrt{8\Delta_h / (1/R_\phi - 1/\rho_0)},$$

если он имеет тот же порядок, что и R_ϕ (рис. 6.58, б) (r_ϕ является положительным во впадине и отрицательным на выступе).

При обработке корпусных деталей на многоцелевых станках с ЧПУ последовательность выполнения переходов можно выбирать, руководствуясь следующими общими рекомендациями: 1) сначала следует планировать предварительную обработку, а затем — чистовую; 2) чем выше точность компонента обрабатываемой заготовки, тем позже следует предусматривать его чистовую обработку; 3) чем меньше время срабатывания исполнительного органа (для смены инструмента, для поворота и позиционирования стола), тем чаще этот орган должен функционировать (например, параллельный или последовательный метод обхода в цикле обработки группы одинаковых отверстий).

На четвертом шаге синтеза операции выбираются по справочнику или определяются путем расчета (см. гл. 5) оптимальные параметры режимов обработки для всех переходов.

6.7.4. Методика проектирования управляющей программы

Процесс проектирования *управляющей программы* (УП) состоит из следующих этапов (шагов): 1) разработка схемы наладки; 2) заполнение карты подготовки информации; 3) кодирование УП; 4) запись УП на программноноситель; 5) проверка и редактирование УП при обработке первой заготовки.

Схема наладки или *расчетно-технологическая карта* (РТК) разрабатывается в следующем порядке.

1. Вычерчивается деталь (заготовка) в прямоугольной системе координат (или в двух системах координат — станка и детали), выбирается для каждого инструмента исходная точка O_i . Контуры детали и заготовки изображаются в масштабе с указанием всех размеров, необходимых для программирования.

2. Намечается расположение зажимов (зажимных элементов) и зон закрепления заготовки в соответствии с ТУ приспособления.

3. Наносятся траектории движения центров инструментов в двух плоскостях системы координат. Началом и концом траектории инструмента является исходная точка.

4. На траектории движения инструмента отмечаются и обозначаются цифрами опорные точки траектории и ставятся стрелки, указывающие направление движения. Опорные точки следует отмечать по геометрическим и технологическим признакам, т. е. они

должны являться либо точками изменения характера траектории инструмента, либо точками изменения параметров режима обработки, включения вертикального перемещения, смены позиции и т. п. Для сравнительно простых операций на схеме наладки показывают положение всех используемых в операции инструментов с обозначением их вылета.

5. Указываются (если это необходимо) места контрольных точек, в которых предусматривается кратковременная остановка инструмента в целях проверки точности отработки программы рабочими органами станка. Такие точки предусматриваются, например, перед окончательными (отделочными) переходами при изготовлении прецизионных дорогостоящих деталей. Указываются также точки остановок, необходимых для смены инструмента, изменения частоты вращения шпинделя, переустановки заготовок и т. п., и их продолжительность в секундах.

6. На расчетно-технологической карте наносятся дополнительные данные (тип станка, шифр, наименование и материал детали), указываются особенности заготовки и ее установки, параметры инструментов и особенности характера их движения на отдельных участках траектории.

При построении траектории движения центра инструмента нужно придерживаться следующих правил.

1. Подвод инструмента к обрабатываемой поверхности и его отвод в ряде случаев следует выполнять по траекториям. Например, при фрезеровании периферией врезание инструмента на глубину резания осуществляется по дуге окружности, касательной к обработанной поверхности, со своевременным (за 5...10 мм до поверхности заготовки) переходом с холостого хода на рабочий. Определенный подход на рабочей подаче должен быть у всех инструментов, при этом точка перехода с холостого хода на рабочий должна быть определена как опорная.

2. Недопустимы остановки инструмента и резкие изменения подачи в процессе резания, иначе возможны грубые повреждения обработанной поверхности.

3. Длина холостых ходов должна быть минимальной.

4. С целью устранения влияния люфтов на точность обработки следует предусматривать дополнительные петлеобразные переходы в зонах реверса, обеспечивающие выборку люфтов.

5. В случае необходимости по расчетной силе резания определяется деформация технологической системы и вводится «предискажение» траектории, компенсирующее упругие отжимы технологической системы.

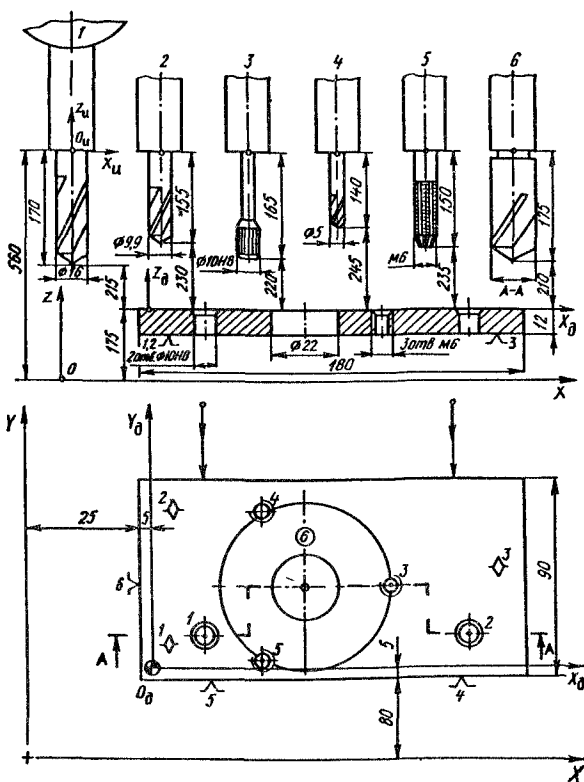


Рис. 6.59. Расчетно-технологическая карта обработки отверстий в заготовке крышки

В качестве примера на рис. 6.59 показана схема наладки для обработки в заготовке детали «крышка» двух отверстий диаметром 10H8, трех резьбовых отверстий М6 и отверстия диаметром 22 мм. Изготавливаемая деталь связана с двумя системами координат: станка (XYZ) с началом в точке O и детали ($X_d Y_d Z_d$) с началом в точке O_d . Ось каждого инструмента связана со своей системой координат ($X_i Y_i Z_i$) с началом в точке O_i , лежащей на торце шпинделя. Координаты точек пересечения осей всех отверстий с плоскостью координат $X_d Y_d Z_d$ обычно заносятся в таблицу (табл. 6.15).

Заранее определенные переходы и необходимый инструмент показаны на рис. 6.60, где $a, б$ — центрирование сверлом диаметром $d = 16$ мм и $\varphi = 90^\circ$; $в, г, ж$ — сверление под развертывание и

Табл. 6.15. Координаты опорных точек (см. рис. 6.59)

Номер от- верстия	Координаты (мм) по осям				
	X_D	Y_D	X	Y	Z
1	20	20	50	105	175
2	150	20	180	105	175
3	105	40	135	125	175
4	52,5	70, 31	82,3	155, 31	175
5	52,5	9, 69	82,5	94, 69	175
6	70	40	100	125	175

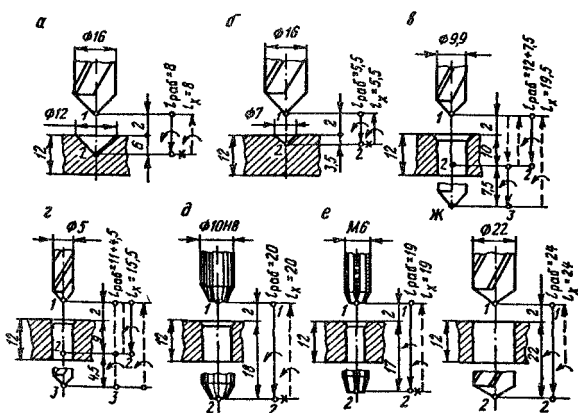


Рис. 6.60. Схемы типовых переходов при обработке отверстий в крышке (см. рис. 6.59)

нарезание резьбы, а также отверстия диаметром 22 мм; *д* — развертывание; *е* — нарезание резьбы. Для выполнения указанных переходов необходимо шесть инструментов, поэтому револьверная головка сверлильного станка с ЧПУ должна иметь не менее шести гнезд. Поскольку подъем шпинделя в позицию смены инструмента и поворот револьверной головки осуществляются не быстрее, чем позиционирование стола, применяется комбинированный метод обхода обрабатываемых отверстий, т. е. последовательность переходов должна быть такой: 1) центрование отверстий 1...5 на глубину, обеспечивающую необходимый размер фаски; 2) сверление отверстия б; 3) сверление и развертывание отверстий 1 и 2; 3) сверление отверстий 3...5 и нарезание резьбы в них.

Схемы осевых перемещений для расчета координат опорных точек приведены на рис. 6.60, где цифрами 1...3 обозначены последовательности опорных точек движения инструментов по оси Z , стрелками — направления рабочих и холостых ходов и направления

вращения шпинделя. Знаком x обозначен выстой инструмента.

Длины холостых и рабочих перемещений по осям X , Y , Z для всех переходов, а также номер используемого инструмента и параметры режима резания заносятся в карту подготовки информации.

Кодирование УП осуществляется в соответствии с ГОСТ 20999—83. УП представляет собой последовательность кадров, каждый из которых состоит из переменного числа слов. Каждое слово состоит из буквы, называемой адресом, и следующей за ней группы цифр. Порядок слов в кадре произвольный, но в одном кадре нельзя записывать два слова с одинаковым адресом. Каждый кадр начинается номером и заканчивается символом перевода строки (*). Некоторые символы адресов для УЧПУ токарных станков приведены в табл. 6.16. Группы цифр обозначают чаще всего значения соответствующих величин, иногда — коды.

Табл. 6.16. Символы адресов станка 16К20 Ф3

Символ адреса	Значение символа
A	Припуск на чистовую обработку
B	C какого кадра повторение
C	Фаска под углом 45°
E	Функция подачи (быстрый ход)
F	Функция подачи (рабочая подача, шаг резьбы)
H	Число повторений
L	Цикл
M	Вспомогательная функция
P	Глубина резания
Q	Галтель
R	Дуга (радиус)
G	Подготовительная функция
S	Частота вращения шпинделя
T	Функция инструмента
X	Перемещение по оси X в абсолютных значениях
Z	Перемещение по оси Z в абсолютных значениях
V	Перемещение по оси X в приращениях
W	Перемещение по оси Z в приращениях

Перемещения записываются в абсолютных или относительных координатах с точностью до 0,001 мм с программированием десятичной точки, если программа вводится с пульта управления.

Подача (адрес F) задается в миллиметрах на оборот заготовки. Частота вращения (адрес S) задается диапазоном и значением, так как на станке имеется несколько диапазонов частот, переключаемых вручную, внутри которых частота может регулироваться непрерывно. Дискретность регулирования подачи (шага резьбы) 0,001 мм.

Номер инструмента задается по адресу T. Количество позиций в револьверной головке станка — 10. Стандартные (постоянные) циклы задаются по адресу L. Перечень (неполный) постоянных циклов станка 16K20 Ф3 приведен в табл. 6.17.

Табл. 6.17. Постоянные циклы станка 16K20 Ф3

Код цикла	Функция цикла
L01	Цикл нарезания резьбы резцом; в кадре указываются: F — шаг, W — длина резьбы, X — внутренний диаметр резьбы, A — наклон резьбы для конических резьб, P — глубина резания за проход, C — сбег (C1 — сбег равен шагу, C0 — сбег отсутствует)
L02	Цикл прорезания прямоугольных канавок; указываются: X — внутренний диаметр канавки, A — ширина канавки, P — ширина резца
L03	Цикл «петля» при наружной обработке; указывается U — длина петли
L06	Цикл глубокого сверления; указываются: P — максимальная глубина сверления за один проход, W — общая глубина сверления
L07	Цикл нарезания резьбы метчиком или плашкой; указываются: F — шаг резьбы, W — ее длина
L08	Цикл предварительной многопроходной обработки; указываются: A — припуск (на диаметр) под чистовую обработку, максимальная глубина резания
L10	Цикл чистовой обработки по контуру с заданного номера кадра; указывается B — номер кадра начала описания контура детали

Фаска по углом 45° задается адресом C со знаком и конечным размером по той координате, по которой идет обработка заготовки перед фаской. Знак под адресом C должен совпадать со знаком обработки по оси X. На рис. 6.61 приведены примеры фасок, записи обработки которых в кадре УП имеют вид (опорные точки показывают порядок обработки): U20C5 (а), X30C4 (б), Z-22C6 (в), W-12C4 (г), U24C-3 (д), X20C-4 (е).

Галтель задается адресом Q со знаком и конечным размером по той координате, по которой идет обработка перед галтелью. Знак под адресом Q должен совпадать со знаком обработки по оси X.

УП обработки заготовки детали, показанной на рис. 6.64, с применением циклов L08 и L10 имеет вид:

N 001	F0, 12 S2 200 T1 *	N 009	Z-65 *
N 002	Z0 X96 E *	N 010	X84 W-23 *
N 003	L08 A1 P3 *	N 011	W-12 *
N 004	X38C2 *	N 012	S2 800 T2 *
N 005	Z-20 *	N 013	Z0 E *
N 006	X44C2 *	N 014	X34 E *
N 007	Z-47, 8Q5 *	N 015	L10 B4 *
N 008	X68Q5 N 016 *	M02 *	

где в кадре 001 заданы подача, частота вращения шпинделя и номер резца; кадр 002 указывает координаты исходной точки, из которой резец выходит на ускоренной подаче; в кадре 003 указан код стандартного цикла и заданы припуск на чистовое обтачивание (1 мм) и максимально допустимая глубина резания (3 мм); в кадрах 0,04...011 дано описание контура детали; в кадре 012 изменены частота вращения шпинделя и инструмент; кадры 013 и 014 задают координаты начала цикла чистового обтачивания; в кадре 015 задан цикл чистового обтачивания контура, описание которого начинается с кадра 004; слово M02 означает конец программы.

На станке 16K20 Ф3 УП вводится с пульта управления (ПУ) с клавиатурой. Набор программы осуществляется по кадрам, которые высвечиваются на экране. Клавиатура ПУ позволяет стирать ошибочно введенную информацию и переводить в память УЧПУ правильно записанный кадр. Можно также просмотреть введенную УП полностью или с определенного кадра.

Режим «Ввод» позволяет редактировать введенную в память УП информацию путем стирания любых кадров программы, исключения любого слова из любого кадра, вставки одного или нескольких слов в любой кадр программы. В данном режиме осуществляется также ввод констант с точностью до 0,001 мм в память УЧПУ и их редактирование. К константам относятся: плавающий нуль, координаты исходного положения, вылеты инструментов, параметры станка. В параметры станка входят программные ограничители перемещения по координатам X и Z, минимальные и максимальные частоты вращения шпинделя в трех диапазонах регулирования и в режиме поддержания постоянной скорости резания. Каждый параметр станка имеет номер и определенное значение.

6.8. Проектирование операций обработки фасонных поверхностей

Все многообразие деталей, имеющих фасонные поверхности, можно разбить на два класса: инструменты и фасонные детали. К инструментам относятся: модели, пуансоны и матрицы штампов (ковочных, вырубных, вытяжных), рабочие элементы пресс-форм и литейных форм. Примером фасонных деталей могут служить гребные винты, пропеллеры, лопадки паровых и газовых турбин, коноиды, кулачки и т. д.

Для обработки фасонных поверхностей используются точение, строгание, долбление, фрезерование, шлифование, электроэрозия и электрохимия. С точки зрения формообразования обработка фасонных поверхностей осуществляется: 1) методами копирования образующей; 2) программными методами; 3) методами кинематической настройки.

В случае применения методов первого класса обработка ведется фасонным специальным инструментом, форма лезвия которого соответствует форме образующей фасонной поверхности. С применением методов второго класса обработка ведется универсальным инструментом (резец, фреза, шлифовальный круг и т. д.), а необходимая форма обрабатываемой поверхности обеспечивается за счет управления движениями подач по заданной программе. Программононосителем может быть либо копир, либо ячейки памяти УЧПУ.

Методами третьего класса обработка ведется также универсальным инструментом, но необходимая форма получается путем настройки на сочетание простого главного движения и простых движений подач. Методы этого класса менее универсальны, чем методы первого и второго, т. е. разнообразие форм фасонных поверхностей, которые могут быть обработаны, ограничено цилиндридами с циклоидальными, эвольвентными, эллиптическими и другими поперечными сечениями, гиперболоидами вращения. Сочетание фасонного инструмента с кинематической настройкой существенно расширяет технологические возможности методов последнего класса. Проектирование операций в данном случае сводится к выбору метода формообразования, геометрическому расчету профиля фасонного режущего инструмента, копира или траектории инструмента (при обработке на станках с ЧПУ), кинематическим расчетам, определяющим как форму обработанной поверхности (для методов третьего класса), так и режимы обработки. Методы проектирования фасонного инструмента подробно рассмотрены в соответствующем курсе. А в данном параграфе будут изложены методы обработки на копировальных станках и необходимые геометрические расчеты копиров.

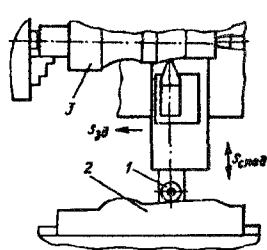


Рис. 6.65. Схема системы прямого копирования для токарного станка:

1 — ролик; 2 — копир; 3 — заготовка; 4 — пружина силового замыкания системы «копир—ролик»; 5 — резец; 6 — устройство коррекции размерной настройки

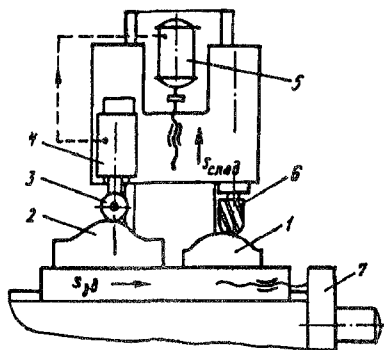
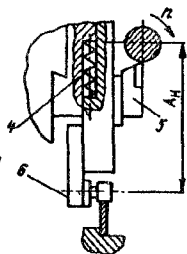


Рис. 6.66. Схема системы опосредованного копирования на фрезерном станке:

1 — заготовка; 2 — копир; 3 — ролик копира; 4 — измерительно-управляющее следящее устройство; 5 — привод следящей подачи; 6 — фреза; 7 — привод задающей подачи

Системы управления подачами на копировальных станках можно разделить на две группы; системы *прямого копирования* и системы *опосредованного копирования*. В первом случае (рис. 6.65) копир непосредственно сообщает перемещающемуся с заданной подачей $s_{зд}$ суппорту (столу) движение следящей подачи $s_{след}$ и воспринимает соответствующие компоненты сил резания и трения, а во втором (рис. 6.66) копир только передает сигнал рассогласования в измерительно-управляющее устройство, которое его преобразует, усиливает и передает приводу следящей подачи $s_{след}$. Последний перемещает бабку с инструментом так и до тех пор, пока сигнал рассогласования не станет равным нулю.

Достоинства систем прямого копирования — простота и надежность. Но поскольку на копир действуют сравнительно большие силы, он должен быть достаточно массивным, прочным и твердым (закаленным), что значительно повышает затраты на изготовление копиров. Кроме того, форма профиля деталей, обрабатываемых с помощью систем прямого копирования, ограничена допустимым углом давления. Если фактический угол давления превышает допустимый, значительно возрастает сила в контакте между копиром и роликом, необходимая для преодоления полезных сил сопротивления и сил трения.

Системы опосредованного копирования не имеют ограничений по углу давления. Кроме того, копир можно делать незакаленным и небольшой толщины, так как сила его воздействия на копиру-

вальный ролик в таких системах не превышает 3 Н.

В общем случае следящая ($s_{\text{след}}$) и задающая ($s_{\text{зд}}$) подачи могут быть как поступательными, так и круговыми. Четыре варианта сочетаний этих подач показаны на рис. 6.67.

У копира (как и у детали, подлежащей обработке) различают реальный профиль 1 и центровой профиль 2, который описывает в относительном движении ось ролика, работающего в паре с копиром.

Геометрическими характеристиками копиров являются углы α , θ и η , которые меняют свое значение в разных точках центрального профиля.

Угол α между направлением задающей подачи и касательной к центральному профилю будем называть *углом подъема*, угол θ между направлением следящей подачи и нормалью к профилю — *углом давления*, а угол η между следящей подачей и нормалью к задающей — *углом смещения*. Данные определения верны для любого сочетания видов следящей и задающей подач (см. рис. 6.67). Угол считается положительным, если он отсчитывается от вектора подачи к касательной (или нормали) против часовой стрелки. Между данными углами имеет место следующая очевидная связь: $\theta = \alpha + \eta$.

Профиль обрабатываемой поверхности лучше всего описывать сочетанием отрезков прямых и дуг окружностей. В таком случае и профиль копира будет описываться соответствующим набором отрезков и дуг, что существенно облегчает программирование его обработки на станке с ЧПУ. На рис. 6.68 показана деталь, реальный профиль которой описан координатами опорных точек 1...5 отрезков прямых и дуг окружностей радиусами $R_{\text{проф1}}$ и $R_{\text{проф2}}$. Центральной профилем описывается координатами

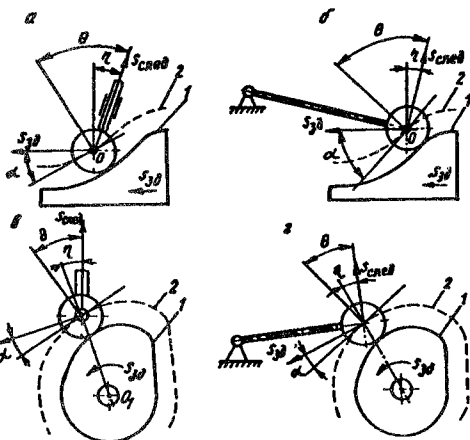


Рис. 6.67 Варианты сочетаний задающей и следящей подач

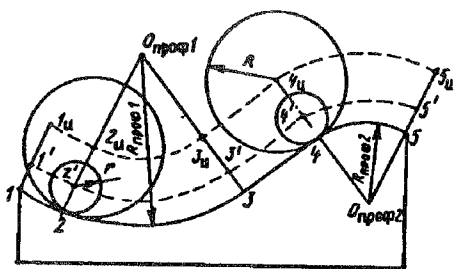


Рис. 6.68. Схема формирования профиля копира

натами опорных точек $1' \dots 5'$ и радиусами дуг, равными $R_{\text{проф } 1} - r$ и $R_{\text{проф } 2} + r$, где r — радиус ролика.

Если данная заготовка обрабатывается инструментом (фрезой, шлифовальным кругом), радиус которого R , то траектория движения его оси образует профиль, который также описывается опорными точками $1_{и} \dots 5_{и}$ отрезков и дуг радиусами $R_{\text{проф } 1} - R$ и $R_{\text{проф } 2} + R$. Относительное движение оси инструмента именно по

этому профилю должен обеспечить копир, поэтому его центральной профиль при наложении должен совпадать с последним ($1_{и} \dots 5_{и}$).

Предположим, что задан центральной профиль копира, работающего в паре с роликом, радиус которого равен r . Прямолинейный участок профиля в декартовых координатах задан координатами начала ($x_{i-1}; y_{i-1}$) и конца ($x_i; y_i$), где i — номер опорной точки (рис. 6.69, а). Тогда координаты центральной профиля копира определяются следующим образом:

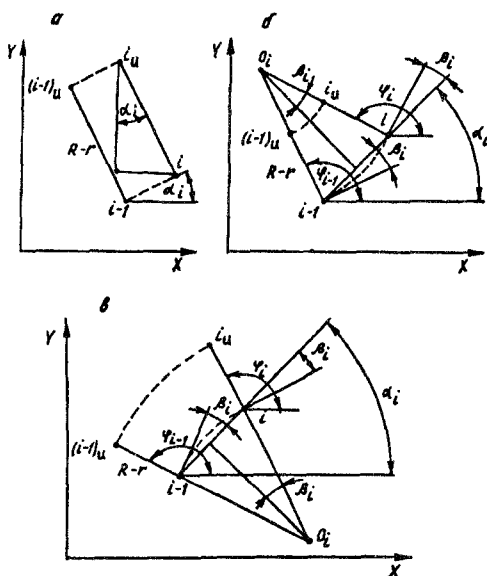


Рис. 6.69. Расчетные схемы для определения координат опорных точек профиля копира

$$x_{\text{коп } i} = x_i - (R - r) \sin \alpha_i + x_c;$$

$$y_{\text{коп } i} = y_i + (R - r) \cos \alpha_i + y_c,$$

где $\text{tg} \alpha_i = (y_i - y_{i-1}) / (x_i - x_{i-1})$; x_c, y_c — параметры, учитывающие разницу в габаритных размерах копира и обрабатываемой заготовки детали (задаваемых конструктивно). Эти выражения верны и для начала отрезка с номером $i - 1$.

Если заданы координаты начала и конца вогнутого радиусного участка контура (рис. 6.69, б) и его радиус $R_{\text{проф } i}$, то координаты центральной профиля копира определяются согласно следующему алгоритму.

Сначала определяется длина половины хорды:

$$b_i = \sqrt{(x_i - x_{i-1})^2 + (y_i - y_{i-1})^2} / 2.$$

Затем находят опорный угол:

$$\beta_i = \arcsin (b_i / R_{\text{проф } i}).$$

Координаты опорных точек соответствующего радиусного участка копира определяются из уравнений:

$$x_{\text{коп } i} = x_i + (R - r) \sin \varphi_i + x_c;$$

$$y_{\text{коп } i} = y_i + (R - r) \cos \varphi_i + y_c;$$

где для начальной точки дуги ($i - 1$)

$$\varphi_i = 90^\circ + \alpha_{ci} - \beta_i; \quad (6.9)$$

а для конечной точки дуги (i)

$$\varphi_i = 90^\circ + \alpha_{ci} + \beta_i. \quad (6.10)$$

Угол α_{ci} наклона хорды

$$\alpha_{ci} = \arcsin (y_i - y_{i-1}) / (2b_i).$$

Радиус R дуги копира

$$R_{\text{коп } i} = R_{\text{проф } i} - (R - r). \quad (6.11)$$

Если дуговой участок выпуклый (рис. 6.69, в), то значения b_i , β_i , x_i и y_i определяются аналогично. Только в формулах (6.9) и (6.10) перед β_i , а в формуле (6.11) перед $R - r$ необходимо поменять знак «+» на «-».

Затем на участке подъема у копира необходимо определить максимальный угол подъема α_{max} . Для этого анализируются (путем сравнения друг с другом) значения углов α_i (α_{ci}) для каждого участка копира и выбирается участок с наибольшим значением названного параметра. Если этот участок будет представлять собой отрезок прямой, то $\alpha_{\text{max}} = \alpha_{\text{коп } i}$. Если это вогнутый дуговой участок, то максимальное значение угла подъема будет на его конце и определяется выражением $\alpha_{\text{max}} = \alpha_{ci} + \beta_i$. Если это выпуклый дуговой участок, то максимальное значение угла подъема будет в его начале и определяется этим же выражением.

Для хорошей работы копира в системе прямого копирования необходимо, чтобы $\alpha_{\text{max}} \leq \theta_m - \eta$. Если данное условие не соблюдается, то можно изменить схему базирования заготовки, как это

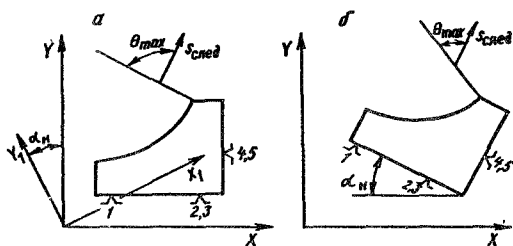


Рис. 6.70. Схемы уменьшения угла давления путем изменения схемы базирования

ординаты его опорных точек заданы в полярной системе координат.

Если фактический радиус инструмента ($R_{\text{факт}}$) отличается от заданного при геометрическом расчете копира (R), возникает систематическая погрешность, которую называют *погрешностью копирования* $\delta_{\text{коп}}$. Схема возникновения этой погрешности показана на рис. 6.71. Чтобы скомпенсировать изменение радиуса инструмента, осуществляют коррекцию размерной настройки на некотором участке профиля. Поскольку при этом закон перемещения оси инструмента не изменяется, не меняется также расстояние между осями расчетного и фактического инструментов (результат коррекции на Δy).

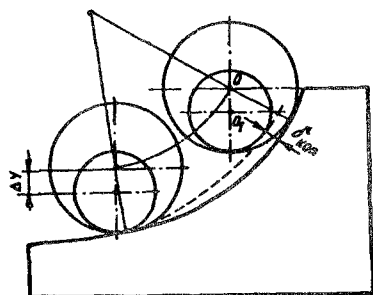


Рис. 6.71. Схема возникновения погрешности копирования

Но при этом изменении угла давления инструмент либо не достигает требуемого профиля, либо подрезает его. Полученный таким образом профиль показан на рис. 6.71 штриховой линией.

В соответствии со схемой, приведенной на рис. 6.72, из треугольников OO_1A и OO_1B получаем

$$\delta_{\text{коп } i} = (R - R_{\text{факт}})(1 - \cos\theta_i / \cos\theta_0),$$

где i — номер точки соприкосновения расчетного инструмента с расчетным профилем; 0 — номер точки профиля, в котором осуществлялась коррекция; θ_i, θ_0 — соответствующие углы давления.

Исследования показали, что погрешность копирования можно частично компенсировать, если соответственно разности радиусов $R - R_{\text{факт}}$ изменить (согласно довольно сложным уравнениям) радиус ролика, который работает с копиром.

10. Назовите процедуры аналитического этапа индивидуального проектирования технологических процессов.
11. Назовите цели анализа конструкторской информации.
12. С помощью чего производится формальная проверка правильности простановки размеров на чертеже детали?
13. О чем говорит наличие замкнутых контуров на графе размерных связей?
14. О чем говорит наличие оторванных групп вершин на графе размерных связей?
15. Как должны быть связаны обработанные и необработанные поверхности на графе размерных связей?
16. По каким признакам различаются машиностроительные производства?
17. Каким показателем характеризуется тип производства по однотипности выпускаемой продукции?
18. От чего зависит коэффициент закрепления операций?
19. Какую информацию дает оценка типа производства?
20. Назовите классы методов получения заготовок деталей машин.
21. Что обуславливает выбор класса методов получения заготовок?
22. Изобразите зависимость затрат на изготовление и механическую обработку заготовки от качества ее точности.
23. Назовите методы определения маршрута обработки типовой поверхности.
24. Какими параметрами описывается состояние типовой поверхности?
25. В каком направлении формируется маршрут обработки типовой поверхности методом последовательного уточнения?
26. Укажите структуру массива переходов, с помощью которого строится маршрут обработки типовой поверхности.
27. Укажите структуру массива типовых маршрутов обработки типовых поверхностей.
28. Сформулируйте принцип совмещения технологических баз.
29. Сформулируйте принцип единства технологических баз.
30. В каких случаях предпочтительнее принцип единства технологических баз?
31. Назовите задачи, которые решаются при выборе технологических баз на первой операции.
32. Как формально выбрать базы на первой операции, обеспечивающие наиболее точное относительное расположение групп обработанных и необработанных поверхностей?
33. Как выбрать базы на первой операции, обеспечивающие равномерный припуск на ответственной поверхности?
34. Какие преимущества дает равномерное распределение припуска на ответственной поверхности?
35. В каких случаях выбор баз на первой операции с помощью графа размерных связей является ошибочным?
36. Назовите процедуры синтеза маршрута обработки детали.
37. Как упорядочить переходы в пределах каждого чистового или отделочного этапа типовой схемы обработки?
38. Назовите цели размерного анализа технологического процесса.
39. Назовите процедуры размерного анализа технологического процесса.
40. Расскажите о ребрах исходного и производного графов.
41. Сформулируйте правило знаков при обходе замкнутого контура совмещенного графа.

42. От какой вершины необходимо начинать обход замкнутого контура при записи уравнения технологической размерной цепи?
43. Сформулируйте правило ребер при формировании замкнутого контура на совмещенном графе.
44. Назовите составляющие минимального операционного припуска.
45. В каких случаях пространственные отклонения не включаются в минимальный операционный припуск?
46. В каких случаях погрешность установки не включается в минимальный операционный припуск?
47. Дайте характеристику этапов группирования переходов обработки на токарно-револьверных автоматах.
48. Какая цель ставится при назначении порядка обработки соосных наружных или внутренних поверхностей на токарно-револьверных автоматах?
49. Что необходимо предусмотреть при сверлении глубоких отверстий на токарно-револьверных автоматах?
50. Как обеспечить высокую точность по соосности наружных и внутренних поверхностей, обработанных на токарно-револьверном автомате?
51. Как уменьшить влияние погрешности фиксации револьверной головки на погрешность диаметра обточенной поверхности?
52. Назовите параметры, которые определяются при проектировании кулачка подачи револьверной головки.
53. Назовите классы методов обработки фасонных поверхностей.
54. Назовите классы копировальных систем.
55. Назовите достоинства и недостатки копировальных систем прямого копирования.
56. Назовите характеристики копиров.
57. Изобразите схему копира вида ПП.
58. Изобразите схему копира вида КП.
59. Изобразите схему копира вида ПК.
60. Изобразите схему копира вида КК.
61. Назовите этапы геометрического расчета копира.
62. Назовите методы предотвращения заклинивания при прямом копировании.
63. Дайте определение понятия «погрешность копирования».
64. От чего зависит погрешность копирования?

ЛИТЕРАТУРА

- 1 *Горохов В.А.* Оснастка для поверхностного пластического деформирования в автоматизированном производстве. Мн., 1992.
- 2 *Горохов В.А.* Проектирование и расчет приспособлений. Мн., 1986.
- 3 *Комиссаров В. И., Леонтьев В. И.* Точность, производительность и надежность в системах проектирования технологических процессов. М., 1985.
- 4 *Маталин А. А.* Технология машиностроения. Л., 1985.
- 5 *Митрофанов С. П.* Групповая технология машиностроительного производства: В 2 т. Л., 1983.
- 6 *Насретдинов А. В., Пац И. Н., Мешков Е. В.* Проектирование организационно-технологических структур производственных систем механической обработки. Л., 1991
- 7 *Новиков М. П.* Основы технологии сборки машин и механизмов. М., 1980.
- 8 Проектирование технологических процессов механической обработки в машиностроении / В. В. Бабук, В. А. Шкред, Г. П. Кривко и др., Под ред. В. В. Бабука. Мн., 1987.
- 9 Сборка и монтаж изделий машиностроения: В 2 т. / П. П. Алексеенко, Л. Г. Григорьев, В. С. Демин и др.; Под общ. ред. В. С. Демина, П. П. Алексеенко. Т. 1. М., 1984.
- 10 *Старостин В. Г., Лелюхин В. Е.* Формализация проектирования процессов обработки резанием. М., 1986.
- 11 *Цветков В. Д.* Системно-структурное моделирование и автоматизация проектирования технологических процессов. Мн., 1979.
- 12 *Ящерицын П. И., Махаринский Е. И.* Планирование эксперимента в машиностроении. Мн., 1985.

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ*

- Автоколебания 246
Автоматизированная система управления многопараметрическая 291
— — — — — однопараметрическая 291
Автоматическая система регулирования 291
— — — — — программного 291
— — — — — стабилизации 291
Агрегат 301
Алгоритм управления съемом припуска 76—77, 240
— — — — — по каналу радиальной подачи граничный 241
— — — — — ступенчатый 77
- База 168
— измерительная 169
— конструкторская 168
— направляющая 169
— — двойная 169
— опорная 169
— — двойная 169
— — тройная 169
— сборочная 168
— — вспомогательная 168
— — основная 168
— скрытая 170
— технологическая 169
— установочная 169
— явная 170
- Базирование 168
— выверкой 173
— по разметке 173
— сопряжением 173—174
- Балансировка динамическая 152
— статическая 152
- Ведомость оснастки 326
Виброгасители 255
Вид поверхности 18
Виды напильников 156
Вход в способ 32
Выглаживание алмазное 100
Выход из способа 32
- Группа поверхностей 18
- Дерево целей 15
- Деталь базовая 303
— комплектующая 303
— машины 16
— соединительная 303
- Деформация упругая относительная 79
Деформирование пластическое 145
— — — — — поверхностное 98
- Дисбаланс 152
Доводка 91, 158
Долбление 40
Допуск 17
Дорн 99
Дорнование 99
- Единица машины функционально-сборочная 16
- Жесткость 191
— динамическая 193
— статическая 193
- Жидкость смазочно-охлаждающая 46
- Задачи выбора 301
— расчетные 301
- Затраты приведенные 269, 270
Зачистка 156
Звено размерной цепи замыкающее 181
— — — — — составляющее 181
- Зенкерование 49
Зубодолбление 114, 120
Зубонарезание 111
Зубострогание 114
Зубофрезерование 111, 119—121
Зубошевингование 116
— дисковым шевером 116, 121
— параллельное 116
Зубошлифование обкаткой 121
— профилированным кругом 121
- Индекс производительности 269
— — — — — эффективности 270
- Инструмент лимитирующий 279
Интеграция обработки 38
- Карта маршрутная 379
— — — — — операционная 379
— — — — — расчетно-технологическая 399

* Составила Е. В. Малышева

- сборки комплектовочная 326
- технологического процесса 326
- эскизов 327, 379
- Керметы 97
- Класс поверхности 18
- Колесания вынужденные 246
- Комплекс направляющий 36
 - энергетический 36
- Компенсатор конструкторский 190
- Комплект 301
- Компонент 9
 - функциональный 16
- Конструкция типовая 299
- Конфигурация системы 10
- Копирование опосредованное 408
 - прямое 408
- Коэффициент качества сборки 326
 - наследования 208
 - поточности сборки 326
 - типизации 326
 - уровня механизации 326
 - уточнения 209
- Крепление жесткое 37
 - эластичное 37
- Критерий качества системы 11
- Круги композиционные 245
- Маршрут обработки 25
- Материалы для проектирования вспомогательные 298
 - — — основные 298
 - — — перспективные 297
 - — — руководящие 298
- Метод агрегатирования 323
 - весовых коэффициентов 344
 - взаимозаменяемости групповой 185
 - — неполной 185
 - — полной 184
 - изготовления 33
 - медиан и крайних значений 217
 - подбора 188
 - последовательного уточнения 349
 - пригонки 189
 - «пробных проходов» 177
 - «пробных стружек» 177
 - средних и размахов 217
 - типовых маршрутов 349
- Методы обработки параллельные 38
 - — последовательные 38
 - — технологической компенсации 185
- Модуль детали функциональный 22
- Нагрев индукционный 148
 - ультразвуковой 148
- Накатывание 101
- Напуск 34, 367
- Нарезание резьбы 42
 - — самозатягиванием 104
- Настройка размерная 174, 178
 - — динамическая единичная 176—177
 - — — на партию деталей 177
- Неуравновешенность 152
 - динамическая 152
 - моментная 152
 - статическая 152
- Обкатывание 101
- Обработка анодно-механическая 131
 - вибрационная 93
 - инструментом закрепленным 37
 - — с одной или двумя степенями свободы 37
 - — «свободным» 37
 - комбинированная 34
 - — с нанесением материала 34
 - — — частичным перераспределением материала 34
 - — — удалением материала 34
 - комбинированными способами 34
 - механическая 34
 - отделочная 38
 - плазменная 34
 - предварительная 38
 - размерная досборочная 155
 - — электрохимическая 128
 - светолучевая 34
 - ультразвуковая 124
 - чистовая 38
 - электрическая 34, 123
 - электрохимическая 124, 128
 - электроэрозионная 123
- Обтачивание 42
- Окружающая среда 9
- Операции многодетальные 27
 - многоинструментные 27
 - многопозиционные 26
 - многоустановочные 27
 - непрерывные двухзонные 27
 - несовмещенные 27
 - однодетальные 27
 - одноинструментные 26—27
 - однопозиционные 26
 - одноустановочные 27
 - периодические двухзонные 27
 - — — однозонные 27
 - с размерной настройкой индивидуальной 28
 - — — — на обработку партии заготовок 28
 - — — совмещением параллельным 27
 - — — — последовательно-параллельным 27
 - — — — последовательным 27
- Операция 25, 26
- Опиливание 156

Отношения элементов системы 9
— — — временные 9
— — — причинно-следственные 9—10
— — — пространственные 9

Пайка 147

Перемещение изделия принудительное 306
— — свободное 306

Переход 9
— блочный 26
— вспомогательный 26
— инструментальный 26
— позиционный 26
— элементарный 26

Поверхность свободная 23

Погрешность закрепления 207
— копирования 412
— положения нестационарная 196
— — систематическая 195
— — случайная 196
— — стационарная 196
— релаксационная 212
— станка геометрическая 200
— — кинематическая 202
— схемы базирования 203
— установки 203

Податливость 191

Подача круговая 62

Подкласс поверхностей 18

Подрезание 42

Подузел 301

Позиция 26

Полирование магнитообразивное 95—98

Предприятие машиностроительное 9

Прием 31, 300

Прижог 228

Признаки подобию конструктивные 384
— — технологические 384

Принцип дифференциации 305
— единства баз 355
— концентрации 305

Припой 147
— мягкий 147
— твердый 147

Припуск 34, 367
— общий 368
— односторонний 368
— операционный 368
— — минимальный 368
— — номинальный 368
— переходный *см.* Припуск операционный

Притирка *см.* Доводка

Программа управляющая 399

Производительность 267

— технологическая 267

Производство единичное 13
— крупносерийное 13
— массовое 13
— мелкосерийное 13
— серийное 13

Прорезание 42

Протягивание 56
— координатное 57

Проход 26

Процесс технологический 12
— — заготовительный 12
— — обеспечивающий 13
— — обрабатывающий 12
— — сборочный 12

Прошивание 57

Работы вспомогательные 135
— сборочные 135

Развертывание 50

Размер зависимый 20
— независимый 20
— определяющий *см.* Размер независимый

Разъем конструктивный 302
— технологический 302

Раскатывание 101

Рассверливание 46

Растачивание 42

Регулирование статистическое 217

Резьботочение 102

Резьбофрезерование 102

Резьбошлифование 104

Решение типовое локальное 301
— — — многоэлементное 301
— — — одноэлементное 301
— — — полное 301

Сборка поточная 307
— — неподвижная *см.* Сборка поточная стационарная
— — подвижная 307
— — стационарная 309
— принудительная 306
— свободная 306
— стационарная 305

Сведения параметрические 300
— структурные 300

Сверление 46

Связь 10
— динамическая *см.* Связь инерционная
— инерционная 246
— координатная 246
— скоростная 246

Синтез операций сборки 323

Система копирования опосредованного 408
— — прямого 408

- сборки осевая 303
- — поперечная 304
- — поперечно-осевая *см.* Система сборки смешанная
- — радиальная *см.* Система сборки поперечная
- — смешанная 304
- управления адаптивная 291
- — самонастраивающаяся 291
- — самоприспосабливающаяся 291
- экстремального регулирования 294
- Склеивание 148
- Состояние системы 11
- Способ 31
- Старение 213
- Строгание 40
- Структура системы 10
- Стык конструктивный 302
- технологический 302
- Сумма приведенных затрат 269
- Суперфиниширование 88
- Схема базирования 171
- замены инструмента параллельная 280
- — — параллельно-групповая 280
- — — раздельная 280
- обработки типовая 25
- сборки технологическая 311
- Такт сборки 308
- Технологичность конструкции 298
- Технология групповая 383
- маршрутная 327
- Тип поверхностей 19
- Точение 42
- Требования технические 17, 18
- Увод сверла 46
- — полный 46
- — удельный 46
- Угол давления 409
- подъема 409
- смещения 409
- Узел 301
- Установ 25, 300
- Устройства управления приводами *см.*
- Устройства управления приводами подач универсальные
- — — контурные *см.* Устройства управления приводами подач непрерывные
- — — — непрерывные 391
- — — — позиционные 391
- — — — универсальные 391
- Ферриты 97
- Флюсы 147
- Форма сборки организационная 312
- — подвижная 305
- Формообразование копированием 109
- Фрезерование 52
- Функция системы 10
- цели 271
- Характеристика системы техническая 10
- Хон 85
- Хонингование 85
- Цекование 50
- Цепь размерная 181
- — конструкторская 183
- — линейная 181
- — плоская 181
- — пространственная 181
- — сборочная 181
- — технологическая 183
- Цикл сборки 308
- рабочий 240
- Шабер 157
- Шабрение 157
- Шевингование 122
- врезное 117
- диагональное 117
- параллельное 116
- тангенциальное 117
- Шлифование 59, 73
- внутреннее 60
- глубинное 59
- круглое 59
- — бесцентровое 60
- — наружное врезное 59
- многопроходное 60
- — круглое наружное с продольной подачей 60
- на жестких опорах 61
- планетарное 60
- предварительное 59
- силовое 59
- тонкое 59
- фасонное врезное круглое 61
- чистовое 59
- эластичное 83
- Экономический эффект относительный 382
- Электронагрев 148
- Элемент 14
- детали неделимый 16
- машины вспомогательный 16
- — основной 16
- системы 9
- Этап проектирования аналитический 324
- — заключительный 326
- — подготовительный 310
- — синтетический 311
- технологического процесса 25
- Эффективность технологического процесса 267

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Основные условные сокращения	5
Введение	7
1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ, ЦЕЛИ И ФУНКЦИИ КУРСА	
1.1. Системный характер машиностроительного производства	9
1.2. Дерево целей и функциональная структура курса «Основы технологии машиностроения»	14
1.3. Машина как объект производства	16
1.4. Компоненты технологических процессов изготовления деталей машин Вопросы для самопроверки	25 30
2. СТРУКТУРНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ	
2.1. Системные характеристики структурных элементов технологических процессов	31
2.2. Признаки классификации методов изготовления деталей машин	33
2.3. Стругание и долбление	40
2.4. Точение	42
2.5. Сверление	46
2.6. Зенкерование и развертывание	49
2.7. Фрезерование	52
2.8. Протягивание	56
2.9. Шлифование	59
2.9.1. Виды и способы шлифования	59
2.9.2. Характеристика шлифовальных кругов	63
2.9.3. Правка шлифовальных кругов	68
2.9.4. Технологические модели и циклы шлифования	73
2.9.5. Особенности формообразования обрабатываемой поверхности при бесцентровом шлифовании	82
2.10. Эластичное шлифование	83
2.11. Обработка абразивными брусками	85
2.11.1. Хонингование	85
2.11.2. Суперфиниширование	88
2.12. Обработка свободным абразивом	91
2.12.1. Доводка	91
2.12.2. Вибрационная обработка	93
2.12.3. Магнитоабразивная обработка	95
2.13. Обработка поверхностным пластическим деформированием	98
2.14. Методы формообразования резьбы	102
2.14.1. Формообразование резьбы резанием	102
2.14.2. Формообразование резьбы пластическим деформированием	105
2.15. Методы формообразования зубчатых венцов шестерен	109

2.15.1. Формообразование зубьев копированием	109
2.15.2. Формообразование зубьев обкаткой	111
2.15.3. Отделка зубьев обкаткой	116
2.15.4. Режимы резания при формообразовании зубчатых поверхностей	119
2.16. Электрическая обработка	123
Вопросы для самопроверки	133

3. СТРУКТУРНЫЕ КОМПОНЕНТЫ ТЕХНОЛОГИИ СБОРКИ МАШИН

3.1. Классификация работ при сборке	135
3.2. Способы сборки неподвижных разъемных соединений	136
3.2.1. Сборка резьбовых соединений	136
3.2.2. Сборка разъемных соединений с натягом	139
3.3. Сборка неподвижных неразъемных соединений	141
3.3.1. Сборка неразъемных соединений с натягом	141
3.3.2. Сборка соединений путем пластического деформирования	145
3.3.3. Сборка пайкой и склеиванием	147
3.4. Очистка перед сборкой	149
3.5. Балансировка деталей и сборочных единиц	152
3.6. Досборочная размерная обработка	155
3.7. Досборочная совместная обработка	161
3.8. Контроль при сборке	162
Вопросы для самопроверки	167

4. ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА ИЗГОТОВЛЕНИЯ МАШИН

4.1. Базирование при сборке и механической обработке	168
4.2. Размерная настройка	174
4.3. Размерные цепи при сборке и механической обработке	180
4.4. Жесткость машин и технологических систем механической обработки	190
4.5. Погрешности сборки и механической обработки	195
4.6. Погрешности, не зависящие от режима резания	200
4.7. Погрешности, зависящие от режима резания	208
4.8. Прочие погрешности при механической обработке	210
4.9. Обеспечение точности обработки	214
4.9.1. Характеристики точности и стабильности технологического перехода	214
4.9.2. Статистическое регулирование точности обработки	217
4.9.3. Автоматическое управление точностью обработки по выходным данным	219
4.9.4. Автоматическое управление точностью обработки по рассогласованию	223
4.10. Обеспечение качества обработанной поверхности	226
4.10.1. Показатели качества поверхностей деталей машин	226
4.10.2. Влияние способов и условий обработки на шероховатость поверхности	229
4.10.3. Влияние способов и условий обработки на состояние подповерхностного слоя материала	235
4.10.4. Управление качеством поверхности при шлифовании	238
4.11. Влияние вибраций на процесс и результаты обработки	245
4.11.1. Источники вибраций при лезвийной обработке резанием и шлифовании	245

4.11.2. Борьба с вибрациями при обработке на станках	249
4.11.3. Использование вибраций при обработке на станках	258
Вопросы для самопроверки	265
5. ЭФФЕКТИВНОСТЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН	
5.1 Основные понятия	267
5.2. Функции цели и модели ограничений параметрической оптимизации	271
5.3. Оптимизация режимов резания для элементарного и инструментально- го переходов	276
5.4. Оптимизация режима обработки однородным блоком	279
5.5 Оптимизация режима обработки неоднородным блоком с общими частотой вращения и подачи	283
5.6. Влияние временной структуры операции на ее эффективность	285
5.7. Автоматическая оптимизация режимов резания	289
Вопросы для самопроверки	296
6. МЕТОДИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ	
6.1 Общие положения	297
6.2. Проектирование технологических процессов сборки	301
6.2.1. Требования к технологичности конструкции при сборке	301
6.2.2. Организационные формы сборки	305
6.2.3. Методика проектирования технологических процессов сборки	310
6.3. Методика типового проектирования технологических процессов обработ- ки заготовок	328
6.4. Методика индивидуального проектирования технологических процессов обработки заготовок	332
6.4.1. Порядок решения задачи	332
6.4.2. Анализ конструкторской информации	334
6.4.3. Определение типа производства	336
6.4.4. Выбор метода изготовления заготовок	339
6.4.5. Синтез маршрута обработки типовых поверхностей заготовки	348
6.4.6. Синтез вариантов схем базирования	353
6.4.7. Синтез маршрута обработки заготовки	358
6.4.8. Синтез структуры операции	362
6.4.9. Назначение допусков на технологические размеры	365
6.4.10. Определение минимальных припусков	367
6.4.11. Размерные схемы и размерные цепи технологического процесса	371
6.4.12. Методика расчета по уравнениям размерных цепей	373
6.4.13. Методика выполнения завершающих процедур	377
6.5 Совершенствование технологических процессов	380
6.6 Проектирование операций обработки на токарно-револьверных автоматах и полуавтоматах	385
6.6.1. Технологические возможности токарно-револьверных автоматов и полуавтоматов	385
6.6.2. Методические рекомендации по построению операций и проектирова- нию наладок	386
6.6.3. Алгоритм проектирования кулачка подачи револьверной головки	389
6.7. Проектирование операций обработки на станках с ЧПУ	391
6.7.1. Классификация и технологические характеристики оборудования	391

6.7.2. Требования к технологичности деталей, изготавливаемых на станках с ЧПУ	393
6.7.3. Методика проектирования операций обработки на станках с ЧПУ	395
6.7.4. Методика проектирования управляющей программы	399
6.8. Проектирование операций обработки фасонных поверхностей	407
Вопросы для самопроверки	413
Л и т е р а т у р а	416
П р е д м е т н ы й у к а з а т е л ь	417

Учебное издание

Махаринский Ефим Ильич,
Горохов Вадим Андреевич

ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИИ МАШИНОСТРОЕНИЯ

Редактор *Е. В. Малышева*

Художественный редактор *А. Г. Звонарев*

Технический редактор *Л.И. Счисленок*

Корректор *З. Б. Звонарева*

Операторы *И. В. Скубий, И. С. Оликсевич*

Подписано в печать с оригинала-макета 24.02.97. Формат 60x90/16. Бумага офсет. №1. Гарнитура Таймс. Офсет. печать. Усл. печ. л. 26,5. Усл. кр.-отг. 26,5. Уч.-изд.л. 27,12. Тираж 4000 экз. Заказ 5393.

Издательство «Высшая школа» Государственного комитета Республики Беларусь по печати. Лицензия ЛВ № 5. 220048, Минск, проспект Машерова, 11.

Типография «Победа». 222310, Молодечно, ул. Тавлая, 11.